INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



CHRISTOPHER WREN

Septiembre 1981

250 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 60
Septiembre 1981

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

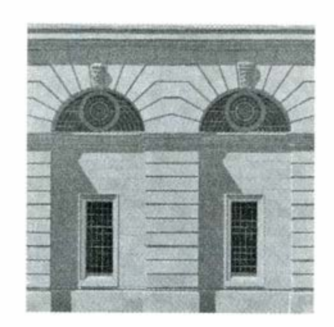
Mireia Bofill Abelló: *Valores y actitudes del pueblo polaco*; José Gabriel Catalán: *La salinidad de los ríos*; Manuel Puigcerver: *La atmósfera de Venus*; Santiago Torres Martínez: *Ingeniería genética en células de mamífero*; Joandomènec Ros: *Mimetismo en las señales sexuales de las luciérnagas*; Juan Bassegoda Nonell: *La arquitectura de Christopher Wren*; Amando Durán Miranda: *Fibrados y teoría cuántica*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Gratiniano Nieto Gallo y Marta Estrada

Libros:

Arturo Valls, Javier de Lorenzo y Luis Condal



LA PORTADA

El grabado de la portada muestra un pormenor de la fachada del Sheldonian Theatre de Oxford, que fue el primer edificio proyectado por Christopher Wren. Basó su diseño, muy notable ya que supuso el abandono de la tradición gótica de Oxford, en el teatro de Marcelo en Roma. El prototipo romano presenta forma de herradura y era a cielo abierto con un toldo deslizante. El teatro de Wren, proyectado en 1662, es una aproximación poligonal a la forma de herradura, con un techo permanente. Llamó la atención en aquel tiempo la ausencia de columnas en un techo de más de 20 metros de luz. A pesar de la belleza y de las cualidades ingenieriles del techo, se sabe que no fue calculado analíticamente (véase "La arquitectura de Christopher Wren", por Harold Dorn y Robert Mark, página 78). En la cresta de la ola de la revolución científica de Europa, enseñó astronomía en Oxford y presidió la Royal Society. Sin embargo, no parece haber relación entre sus conocimientos científicos y su obra arquitectónica.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente	Página	Fuente
7-14	Albert E. Miller	60-67	Albert E. Miller
16	EROS Data Center, National Aeronautics and Space Administration	71-75	A. Rodríguez Navarro y M. Alonso
18-19	Andrew Tomko	76	Díaz de la Guardia
20-21	Ilil Arbel	77	A. Rodríguez Navarro y M. Alonso
22-27	Charlie Siegel, Water and Power Resources Service	78	Thomas Photos, Oxford
24-25	Andrew Tomko	80	John Moss, Black Star
31	Larry D. Travis y Anthony Del Genio, Instituto Goddard de Estudios Espaciales	81	Alan D. Iselin (*arriba y en medio*); Allen Hess (*abajo*)
32-36	Ian Worpole	82	Ralph Morse
37	Larry D. Travis y Anthony Del Genio, Instituto Goddar de Estudios Espaciales	83	Valerio Simini
38	Michael J. S. Belton, Kitt Peak National Observatory	84	Ralph Morse
47	Elaine G. Diacumakos, Universidad Rockefeller	85	John Moss, Black Star
48-56	Bunji Tagawa	86	Robert Vuyosevich y Alan D. Iselin (*arriba*), Robert Mark (*abajo*)
58	James E. Lloyd, Universidad de Florida	87	Valerio Simini y Alan D. Iselin
		88	John Moss, Black Star
		89	Alan D. Iselin
		90	Ralph Morse
		91-105	George V. Kelvin
		109-111	Ilil Arbel
		117-118	David G. Stork
		119-122	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

STEFAN NOWAK ("Valores y actitudes del pueblo polaco") es sociólogo y profesor de la Universidad de Varsovia, ciudad en la que nació y en cuyo centro superior obtuvo su licenciatura en sociología de la literatura en 1951. Dictó un curso de historia de la filosofía del Renacimiento en la universidad durante varios años. Pero decidió volver a los estudios de sociología, doctorándose en metodología y filosofía de las ciencias sociales en 1958. Nowak ha visitado diversas instituciones académicas fuera de Polonia, ya para completar sus estudios, o bien para impartir cursos como profesor invitado. Dos de sus libros han sido traducidos al inglés en los últimos años: *Essays in the Methodology of Social and Behavioral Theories* [Ensayos sobre la metodología de las teorías sociales y del comportamiento] (1976) y *Methodology of Sociological Research* [Metodología de la investigación sociológica] (1977). Preside la Asociación Polaca de Sociología y es miembro del comité ejecutivo de la Asociación Internacional de Sociología.

ARTHUR F. PILLSBURY ("La salinidad de los ríos") pasó toda su vida académica adscrito a la Universidad de California, de la que está jubilado. Se formó en Stanford, por cuya universidad se graduó en ingeniería en 1930. Y como ingeniero de riego trabajó en los centros que la Universidad de California tiene en Berkeley y Riverside. Llegó al campus de los Angeles en 1939, donde dirigiría largo tiempo el departamento de riegos y edafología. Se jubiló en 1972, fecha en que compartía sus clases de ingeniería con la presidencia del Water Resources Center de la Universidad de California en los Angeles.

GERALD SCHUBERT y CURT COVEY ("La atmósfera de Venus") pertenecen al departamento de geofísica y física planetaria de la Universidad de California en Los Angeles. Schubert se graduó por la Universidad Cornell en 1961, en ingeniería física e ingeniería aeronáutica. Ingresó después en la Armada estadounidense, adscrito durante cuatro años al servicio docente de la Escuela Naval de Propulsión Nuclear en Mare Island, California, mientras asistía como alumno de doctorado a la Universidad de California en Berkeley. Desde 1966 se halla en UCLA. Covey cursó su primer ciclo universitario en biología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y se halla completando el segundo en UCLA. Tiene ya dos títulos superiores, ambos de la Universidad de California en Santa Bárbara.

W. FRENCH ANDERSON y ELAINE G. DIACUMAKOS ("Ingeniería genética en células de mamífero") son biólogos celulares con un interés común en la nueva tecnología de recombinación de ADN. Anderson es jefe del laboratorio de hematología molecular del Instituto Nacional del Corazón, Pulmón y Sangre. Enseña genética en la Universidad George Washington. Graduado en el Harvard College, pasó por la Universidad de Cambridge y la Facultad de Medicina de Harvard, donde se doctoró. Anderson ha trabajado para el Instituto Nacional de la Salud desde 1965, cuando fue asignado al laboratorio de genética bioquímica del Instituo Nacional del Corazón, comisionado por el Servicio de la Salud Pública de los Estados Unidos. Diacumakos dirige el laboratorio de citobiología de la Universidad Rockefeller. Estudió en el College Park de la Universidad de Maryland, licenciándose en 1951. Se doctoró por la Universidad de Nueva York en 1958. En 1962, cuando colaboraba con el Instituto Sloan-Kettering para la Investigación del Cáncer, obtuvo una beca especial del Servicio de la Salud Pública para trabajar en el laboratorio de E. L. Tatum en la Universidad Rockefeller.

JAMES E. LLOYD ("Mimetismo en las señales sexuales de las luciérnagas) da clases de entomología y nematología en la Universidad de Florida. Graduado por la Universidad estatal de Nueva York en Fredonia, obtuvo la licenciatura en biología por la Universidad de Michigan en 1962, y se doctoró en entomología por la de Cornell en 1966. Lloyd ha realizado el trabajo de campo sobre las luciérnagas principalmente en las pluviselvas tropicales del sudeste asiático, Nueva Guinea y América Central.

A. RODRIGUEZ NAVARRO ("El potasio y el sodio en las células vivas") es catedrático de microbiología en la Escuela de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Córdoba (España). Estudió en la Universidad Politécnica de Madrid, doctorándose en ingeniería agronómica en 1966. Ha enseñado microbiología y bioquímica en Madrid hasta 1976, cuando se trasladó a su actual destino en la Universidad de Córdoba. Trabajó durante un curso en la Universidad de Oxford. Después de dedicarse varios años a la microbiología de productos con baja actividad de agua dirigió su atención al requerimiento y transporte de cationes alcalinos por las levaduras. Actualmente, y dentro de este campo, estudia los mecanismos de extracción de los cationes, así como los sistemas implicados en la regulación del *p*H y del contenido de los mismos.

HAROLD DORN y ROBERT MARK ("La arquitectura de Christopher Wren") han colaborado en diversos trabajos desde su primer encuentro a fines de los años sesenta en la Universidad de Princeton, donde Dorn se graduó en historia y ciencias y Mark enseñaba ingeniería civil. Dorn, que actualmente es profesor de historia de la ciencia y director del programa de humanidades en el Instituto Stevens de Tecnología, estudió filosofía e ingeniería civil en el College of the City of New York, y matemáticas, en el Instituto Courant de la misma ciudad. Mark, cuyo interés por la tecnología de los edificios históricos ha ido creciendo en los últimos años, detenta la cátedra de ingeniería civil y arquitectura en Princeton. En 1974 dio varias conferencias sobre fotoelasticidad aplicada al cálculo de estructuras góticas en la cátedra Gaudí, de la Universidad Politécnica de Barcelona.

HERBERT J. BERNSTEIN y ANTHONY V. PHILLIPS ("Fibrados y teoría cuántica") son, respectivamente, físico teórico y matemático. Bernstein, que enseña en el Hampshire College, estudió en la Universidad de Columbia. Se doctoró por la de California en San Diego en 1967. Antes de incorporarse a la Facultad de Hampshire, en 1971, fue miembro visitante del Instituto para Estudios Avanzados, profesor de la Universidad Suroriental de Massachusetts, investigador en el acelerador de electrones de Cambridge y profesor visitante en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Lovaina, en Bélgica. Phillips enseña matemáticas en la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. Se graduó por el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1960 y obtuvo su doctorado por la Universidad de Princeton en 1966. Ha trabajado en muchas instituciones, entre ellas, la Universidad de California en Berkeley, el Instituto Steklov de Matemáticas de Moscú, el Instituto para Estudios Avanzados, la Universidad Católica Pontificia de Río de Janeiro y la Universidad de París.

Hace...

José M.ª López Piñero

... cuatrocientos cincuenta años

Se publicó la primera edición de la obra de Juan Luis Vives, *De disciplinis*, uno de los principales textos epistemológicos del Renacimiento.

La relación de la obra de Vives con las ciencias de la naturaleza y sus aplicaciones puede entenderse adecuadamente, considerándola desde la perspectiva de su programa educativo. "Una lectura cuidadosa de los escritos de Vives –ha afirmado Noreña– conduce al convencimiento de que sus últimos doce años de intensa reflexión filosófica estuvieron motivados por un creciente interés de precisar las implicaciones filosóficas de la reforma educativa." El principal resultado de dicha reflexión fue precisamente la publicación de *De disciplinis*.

Desde nuestro punto de vista, entre los supuestos pedagógicos de Vives hay que destacar su insistencia en la necesidad de un conocimiento directo y práctico de las cosas de la naturaleza. La observación de las "res naturae" accesibles a los sentidos debe comenzar, en el inicio mismo de la formación escolar, con las más sencillas, sin que entonces sean oportunas "las controversias, sino la silenciosa contemplación de la naturaleza".

De acuerdo con esta línea, Vives recomienda el estudio de la cosmografía y la historia natural, de la filosofía natural, de la agricultura y de la medicina. Esta última, en especial, la considera como el modelo de "arte" o saber práctico, dedicándole la exposición más detenida y aguda de su tratado *De disciplinis*. "Cuando, hija de la experiencia, controlada por el juicio agudo, el arte de la medicina hubo nacido y crecido –afirma en ella Vives– su corrupción primera y la más maligna y cruel de todas le provino de la carencia de práctica, de experiencia y de criterio filosófico. Muchos son los que confían exclusivamente en los experimentos personales, y muchas veces en los ajenos también, pobres y desarmados de juicio y de esta observación universal, y creen que los experimentos dondequiera tienen valía, siendo así que ellos aprovechan en alguna enfermedad específica de mujer y dañan en la de un hombre, y no conviene el mismo tratamiento a un niño y a un viejo, a un bilioso o a un pituitoso, ni en invierno como en verano, ni en España lo mismo que en Rusia. Otros, por el contrario, bien abastados de preceptos filosóficos, pero vírgenes de toda práctica, sin experiencia de realidades, aplican la mano a las curaciones, siendo así que la parte principal de aquel arte no consiste en la inteligencia y retención honrada de lo que está escrito, sino en la habituación a sus aplicaciones, que cuando se llevan a efecto y obra, más que del teórico es cosa del práctico.

"Pero como sea que cada cual se tiene a sí mismo por muy recomendada la salud, para con la cual, por el descomedido amor que la tenemos, sentimos debilidades y temores sobrado indulgentes, ese amor, conjugado con el miedo, quita todo discernimiento de lo útil y de lo nocivo. Ello hace que no hay hombre alguno que anuncie que va a hacer algo efectivo para nuestra salud, que no le prestemos muy despierta atención, tanto más cuando la enfermedad aprieta y nos aflige con sus acerbos y ardientes escozores. Desilusionados y defraudados más de una vez, volvemos al mismo punto, olvidados del desengaño primero; si ya no es, por ventura, alguno escarmentado por sus propias decepciones y por las ajenas, reacciona en odio de la profesión, teniendo del arte un peligro mayor o que, acosado por la desesperación, prefiere arrostrar una manifiesta crisis mortal que confiarse en manos de una profesión tentada con suceso infeliz por él y por otros; pero de estos hombres hay pocos. Todos los otros, en su casi totalidad, dan crédito a todo el que promete curaciones, y en él depositan su confianza; por eso esta profesión se hizo gananciosísima. ¿Qué no pagará el doliente a quien le libró de un sufrimiento? ¿Habrá, por ventura, alguno tan desatinado que, estando en peligro de muerte, piense en economías y escaseces? ¿Para qué ocasión reserva el dinero quien está en trance de inmediata desaparición? Piel por piel y todo cuanto el hombre tiene dará por su vida, como dice Job. Donosamente Filipo, padre de Alejandro, como padeciese de una luxación de clavícula y un médico le pidiera una inmediata entrega de dinero: 'Toma –le dijo– todo cuanto quieras, pues tú tienes la llave'. Pero en la antigüedad esta profesión rendía mucho más que en esos tiempos nuestros; yo creo que porque parecían mayores y más admirables sus servicios. Pero aún hoy día no faltan a los médicos sus buenos ingresos. Un médico podrá mantenerse y comer en el burgo más podrido, en la aldea más perdida y soledosa, donde ni siquiera sonó el nombre de ninguna de las otras artes. Esta ganancia tan obvia y disponible alucinó a muchos que, arruinados y desesperados, se acogieron a esta profesión como a una última y sagrada áncora y como a la segura arena en el naufragio."

Menos penetrantes son los comentarios de Vives sobre la filosofía natural, ya que, como los demás humanistas, no llegó a comprender el significado de las críticas nominalistas a la dinámica aristotélica tradicional. También era una actitud generalizada entre los miembros del movimiento humanista el desinterés que manifiesta por el cultivo de las matemáticas puras.

Plenamente consecuente con estos supuestos fue la valoración positiva de la técnica por parte de Vives, en abierto enfrentamiento con la tradición platónica y aristotélica que despreciaba los oficios manuales y las "artes mecánicas" como ocupaciones propias de los siervos. Paolo Rossi ha destacado varios pasajes de esta obra de Vives en el contexto del cambio de la imagen social de las relaciones entre ciencia y técnica. Recoge, en primer lugar, sus exhortaciones a los estudiosos a prestar seria atención a los problemas técnicos, a "las artes y descubrimientos humanos en lo que toca y atañe a la alimentación, al vestido, a la vivienda; en esta tarea le ayudarán los tratadistas de agricultura y los que estudian la naturaleza y las propiedades de las hierbas y los animales y los que trataron de arquitectura... las artes de tracción animal en que andan mezclados el caballo, el mulo, el buey y toda suerte de vehículos, así como el arte vecina de la navegación". El hombre culto "no tenga empacho de acudir a las ventas y a los obradores, y preguntar y aprender de los artesanos las peculiaridades de su profesión; porque de muy atrás los sabios desdeñaron apearse a este plano y se quedaron sin saber una porción incalculable de cosas que tanta importancia tienen para la vida".

Vives, sin embargo, no se limita a recomendar el estudio de estas cuestiones únicamente por su utilidad práctica. Rossi ha puntualizado también que el pensador valenciano considera que la técnica proporciona un conocimiento directo de la naturaleza, superior al puramente especulativo. Hablando de los escolásticos, afirma que "tienen una virginal inexperiencia de estas cosas y de esta naturaleza, mejor conocida por



Retrato de Vives, por el grabador Philippe Galle, publicado por el impresor Christoffel Plantijn en un volumen aparecido en Amberes el año 1572. Es el retrato fechado más antiguo que se conoce del pensador valenciano

los labradores y artesanos que no por ellos, filósofos tan grandes. Enojados con esa naturaleza, que ignoraban, fantaseáronse otra a base de bagatelas, de sutilezas, de aquellas zarandajas que nunca Dios creara, que se denominan formalidades, ecceidades, relaciones, ideas platónicas y otras monstruosas invenciones que no entienden los mismos que las engendran, quienes, puesto que no pueden otra cosa, al menos la autorizan con un nombre de sonido y dignidad, llamándola metafísica. Y si ocurre que alguno tiene un ingenio desconocedor de esa naturaleza o propenso a las fantasías o a los sueños delirantes, ése dicen que tiene talento metafísico".

El objetivo general de la reflexión epistemológica de Vives fue, en efecto, rechazar la dialéctica de los escolásticos como fundamento objetivo de la verdad o falsedad de los conocimientos científicos. Como dijo Ernst Cassirer, "La verdadera meta que Luis Vives se traza y persigue por doquier consiste en emancipar a las ciencias empíricas de la metafísica y de la lógica metafísicamente concebida". A falta de una base filosófica general, las diferentes disciplinas tienen que estructurarse a partir de los fenómenos que recoge la experiencia. Vives utiliza el término *experimentum*, pero solamente para designar la observación empírica. El concepto de experimentación no aparece en sus obras, ni siquiera de modo implícito. Tampoco contribuyó a una formulación más precisa de los métodos inductivos. Se limitó, en el fondo, a recomendar una cuidadosa observación de la realidad como alternativa general de las especulaciones escolásticas.

Frente a la literatura panegírica, empeñada en convertir a Vives en "precursor" de planteamientos epistemológicos plenamente modernos, hay que recordar que, como dice Cassirer, en su pensamiento "se mezclan todavía indistintamente las fecundas y positivas sugerencias con las objeciones y postulados confusos". Lo que no puede negarse es la gran influencia que sus planteamientos ejercieron en el desarrollo de la renovación científica.

Valores y actitudes del pueblo polaco

Estudios sociales realizados durante 25 años demuestran que los recientes acontecimientos de Polonia no son fruto de un cambio de valores, sino de la reivindicación de unas instituciones sociales mucho más coherentes con éstos

Stefan Nowak

La prolongada crisis social y política polaca ha concentrado la atención mundial durante casi un año. Se inició en julio de 1980 con una oleada de huelgas desencadenada por un repentino e imprevisto aumento de los precios de la carne. Huelgas de este tipo ya se habían producido en otras ocasiones en Polonia, en 1970 y 1976 particularmente, y siempre por el mismo motivo: un repentino incremento de los precios de los productos alimenticios. Pero las huelgas de julio y agosto del pasado año siguieron un curso distinto. No hubo manifestaciones en la calle, ni disturbios o enfrentamientos con la policía. Los huelguistas ocuparon las fábricas y casi todas sus acciones tuvieron lugar dentro del recinto de las mismas. Estaban mejor organizados que en anteriores ocasiones y esta vez formularon reivindicaciones de carácter más general. La primera fue la petición de un aumento de salarios que compensara la subida de los precios. Pero en la segunda quincena de agosto, cuando la oleada de huelgas alcanzó los astilleros de Gdańsk, Gdynia y Szczecin, a orillas del Báltico, los huelguistas ya empezaban a reivindicar también igualdad y justicia sociales, mitigación de las restricciones impuestas a la libertad de expresión y de prensa y el derecho de los obreros a crear sus propias organizaciones, concretado en el reconocimiento de los sindicatos independientes por el gobierno.

Todo el mundo conoce el curso posterior de los acontecimientos. El gobierno firmó unos acuerdos con los trabajadores, en virtud de los cuales reconocía los Sindicatos libres independientes, reunidos ahora bajo el nombre común de Solidaridad. En pocos meses, diez millones de personas se organizaron en esta confederación. La afiliación constituyó una verdadera avalancha social.

Este proceso, innecesario es decirlo, constituye un desafío para el sociólogo. Aunque no podamos predecir de antemano el desarrollo de los acontecimientos, al menos debemos intentar comprenderlos una vez ocurridos. En el presente artículo me propongo examinar lo sucedido intentando responder a la siguiente pregunta: ¿En qué medida las reivindicaciones formuladas por los obreros en huelga (que contaban con el apoyo de la gran mayoría de polacos afiliados a Solidaridad o que manifestaron su aprobación en los sondeos de opinión pública) eran expresión de unos valores ya existentes en la sociedad polaca antes de iniciarse las huelgas? Si puede demostrarse que estos valores preexistían, podremos pasar luego a interrogarnos sobre su origen y sobre los mecanismos sociales que les dieron forma.

Lo cierto es que poseemos abundantes datos sociológicos sobre estos temas. La sociología cuenta con una larga tradición, que se remonta a finales del siglo XIX, en Polonia y los sociólogos polacos realizaron muchos estudios empíricos antes de la Segunda Guerra Mundial e inmediatamente después de finalizada ésta. La tarea se interrumpió entre 1951 y 1956 –lo que en Polonia denominamos nuestro período "stalinista"– dado el ambiente de confusión y represión que acompañó la implantación del nuevo orden político y social. Cuando pudimos reanudar nuestros estudios, nos concentramos en varios temas, incluida la transformación de las actitudes y los valores de la sociedad polaca.

Las conclusiones y generalizaciones de este artículo se basan en más de 150 estudios realizados por sociólogos polacos a partir de 1956, entre ellos seis extensas investigaciones efectuadas por mis colegas y yo mismo. Muchas de las encuestas plantearon idénticas preguntas a muestras similares de encuestados durante períodos de hasta 20 años, lo cual permite sacar algunas conclusiones sobre la estabilidad o mutabilidad de los valores considerados. Si este tipo de trabajos sirven para comprender los procesos históricos, disponemos de abundantes datos.

Puesto que el término "valor" se emplea en ciencias sociales con varios significados distintos, ante todo explicaré cómo me propongo utilizarlo aquí. Por valores de un individuo entiendo los criterios en que éste se basa para definir cómo deben actuar las personas, qué actuaciones o sucesos merecen aprobación o bien deben ser condenados y qué pauta de relaciones debería existir entre las personas, los grupos y las instituciones. El individuo hace sus valoraciones estableciendo comparaciones con estos criterios y decide en consecuencia que una cosa, un hecho o una forma de actuar es buena o mala, justa o injusta, correcta o incorrecta, deseable o reprochable. En otras palabras, a través de sus valores, el individuo define qué clase de persona quiere ser y en qué tipo de mundo desea vivir, y establece unos criterios para juzgar o valorarse a sí mismo y al mundo.

SISTEMA DE VALORES VIGENTE en la sociedad polaca, documentado a través de cuestionarios y entrevistas realizadas durante los pasados 25 años. Aquí, alumnos de bachillerato de las ciudades de Kielce y Varsovia, sus padres y alumnos de las instituciones de enseñanza superior de Varsovia califican como deseables (+) o reprobables (−) distintos atributos de un sistema social. De los datos se desprende la importante conclusión de que en la sociedad polaca no existen divisiones profundas o sistemáticas en torno a estos temas; por ejemplo, se observaron escasas muestras de "diferencias generacionales". En consecuencia, es razonable afirmar que en Polonia existe un único sistema y no múltiples sistemas de valores.

¿Cuál de las siguientes características debería tener (+) o no debería tener (−) un buen sistema social? No seleccione más de cinco aspectos positivos y cinco negativos		ESTUDIOS DE LAS "DIFERENCIAS GENERACIONALES"				VARSOVIA ESTUDIANTES (1978)
		VARSOVIA (1973)		KIELCE (1972)		
		PADRES	JOVENES	PADRES	JOVENES	
a. Igualdad de oportunidades independientemente del origen social	+	77	79	71	84	83
	−	1	2	1	1	1
b. Un nivel de vida adecuado garantizado para todos los ciudadanos	+	61	58	62	62	54
	−	1	2	1	2	1
c. Libertad de expresión; facilidades para que puedan manifestarse libremente opiniones divergentes	+	46	57	39	59	59
	−	2	3	3	3	2
d. Influencia de todos los ciudadanos en el gobierno de la sociedad	+	38	49	35	47	56
	−	7	6	5	11	7
e. Eficiencia económica	+	43	44	34	35	50
	−	1	0	1	1	1
f. Nivel de ingresos aproximadamente igual para todos los ciudadanos	+	20	25	32	22	12
	−	28	20	17	15	35
g. Acatamiento de las decisiones de las autoridades por parte de los ciudadanos	+	22	11	32	14	8
	−	5	14	4	12	13
h. Nacionalización de la industria	+	29	33	28	46	37
	−	5	7	2	4	3
i. Amplio grado de autonomía para los diversos expertos y especialistas	+	30	22	24	15	14
	−	4	11	6	21	12
j. Un fuerte aparato de poder centralizado que tome todas las decisiones importantes	+	15	12	19	18	8
	−	28	36	22	28	41
k. Igualdad de oportunidades con independencia de las ideas u opiniones de cada individuo	+	25	35	19	27	42
	−	5	4	4	7	3
l. Condiciones adecuadas para que todos los ciudadanos puedan hacer llegar su voz y desarrollar su iniciativa	+	23	23	18	11	32
	−	3	12	5	22	7
m. Nivel de ingresos bastante diferenciado según la cualificación del individuo	+	21	13	17	10	17
	−	22	40	29	50	32
n. Amplio desarrollo de diversas formas de autogobierno	+	9	8	10	5	15
	−	9	22	8	32	10
o. Limitación de la libertad de actuación de los adversarios del sistema político	+	5	8	6	9	3
	−	30	33	24	34	44
p. Ausencia de una abierta y profunda discrepancia de opiniones entre los ciudadanos	+	3	6	4	6	5
	−	24	38	16	30	40

			a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p
a. Igualdad de oportunidades independientemente del origen social	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
b. Un nivel de vida adecuado garantizado para todos los ciudadanos	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
c. Libertad de expresión; facilidades para que puedan manifestarse libremente opiniones divergentes	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
d. Influencia de todos los ciudadanos en el gobierno de la sociedad	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
e. Eficiencia económica	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
f. Nivel de ingresos aproximadamente igual para todos los ciudadanos	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
g. Acatamiento de las decisiones de las autoridades por parte de los ciudadanos	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
h. Nacionalización de la industria	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
i. Amplio grado de autonomía para los diversos expertos y especialistas	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
j. Un fuerte aparato de poder centralizado que tome todas las decisiones importantes	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
k. Igualdad de oportunidades con independencia de las ideas u opiniones de cada individuo	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
l. Condiciones adecuadas para que todos los ciudadanos puedan hacer llegar su voz y desarrollar su iniciativa	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
m. Nivel de ingresos bastante diferenciado según la cualificación del individuo	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
n. Amplio desarrollo de diversas formas de autogobierno	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
o. Limitación de la libertad de actuación de los adversarios del sistema político	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																
p. Ausencia de una abierta y profunda discrepancia de opiniones entre los ciudadanos	VARSOVIA	PADRES																
		JOVENES																
	KIELCE	PADRES																
		JOVENES																

EL ESCASO GRADO DE ASOCIACION entre las respuestas obtenidas en el estudio sobre las "diferencias generacionales" sugiere la existencia de un agregado estadístico cuasi-aleatorio de valores. Una pauta coherente de asociaciones positivas (*cuadros grises*) o negativas (*cuadros de color*) indicaría que muchos de los encuestados suscriben una ideología general con una estrecha correlación entre diversos valores. Considérese, por ejemplo, el caso de un encuestado del cual se sabe que ha escogido el elemento *c* (libertad de expresión); la matriz de correlaciones indica que existe una mayor probabilidad de que también escoja el elemento *k* (igualdad de oportunidades con independencia de las opiniones personales) y una menor probabilidad de que escoja el elemento *e* (eficiencia económica). Sin embargo, son poco frecuentes las correlaciones que abarquen a todos los grupos del estudio y más de la mitad de los posibles pares de respuestas no presentaban ninguna correlación significativa (*cuadros vacíos*). El estudio fue realizado por el autor del artículo en colaboración con A. Banaszkiewicz, M. Gadomska, J. Karpiński, K. Kosela, E. Kolbowska, M. Marody, A. Sulek, T. Szawiel, M. Styczeń y E. Tkaczyk.

La persona, cosa o suceso sometidos a semejante juicio valorativo pueden designarse objetos de un valor. Los valores pueden interpretarse como normas que prescriben la "forma" o naturaleza de un objeto en términos cualitativos. Á veces los valores también pueden expresar de manera casi cuantitativa la "magnitud" o intensidad de una propiedad que debería poseer un objeto. Algunos valores pueden ser percibidos o sentidos con un carácter normativo, de manera que cualquier desviación de los mismos despierta sentimientos de culpabilidad o condena. Este tipo de valores suelen hacer referencia a la religión, la filosofía moral o la ideología social de una persona. Otros valores tienen el carácter de deseos o preferencias privadas; los objetos que no están a la altura de estas normas provocan frustración o disgusto, más que culpabilidad o condena.

Cuando se compara un objeto con su correspondiente criterio axiológico, el signo y la intensidad de la valoración dependen de la diferencia entre la norma y las propiedades percibidas en el objeto. Las personas proyectan un conjunto de normas valorativas sobre la mayoría de los objetos que las rodean; estas normas constituyen un espacio valorativo multidimensional, donde la norma aplicada a cada aspecto del objeto lo sitúa a una determinada distancia sobre una de las varias dimensiones valorativas. Pero, en la valoración total del objeto, las personas conceden mayor importancia a unas normas que a otras y la importancia relativa actúa de multiplicador ideológico del distanciamiento del objeto con respecto a determinada norma. En consecuencia, un conjunto de normas, aplicado a un objeto singular o a una clase de objetos, tiende a constituir un subsistema jerárquico, más o menos coherente, dentro del sistema global de valores del individuo.

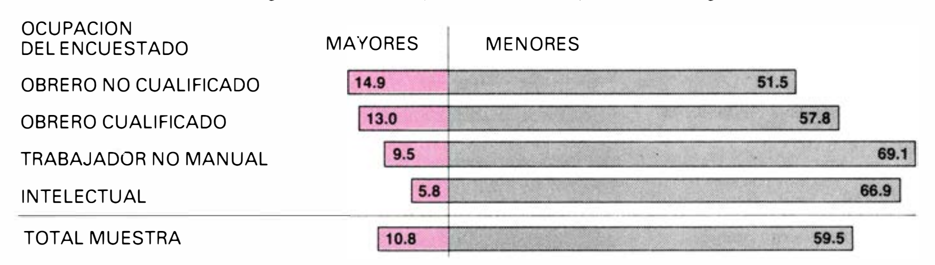
Los grupos jerárquicos de valores, aplicados a distintas clases de objetos, también suelen organizarse en un orden jerárquico. Su ordenación viene determinada, primordialmente, por la importancia relativa atribuida a los objetos a los que se aplican. Por ejemplo, yo puedo estar de acuerdo en que una estructura democrática de las instituciones políticas es importante en cualquier país, pero el multiplicador psicológico que aplico a esta norma es mucho más elevado cuando pienso en mi propio país que cuando pienso en la Roma imperial, por ejemplo. La salud es un criterio importante para valorar la situación de cualquier ser humano,

¿Su posición social es superior o inferior a la que tenía su padre a su misma edad?

OCUPACION DEL ENCUESTADO	INFERIOR	SUPERIOR
OBRERO NO CUALIFICADO	25.7	23.5
OBRERO CUALIFICADO	22.0	38.4
TRABAJADOR NO MANUAL	21.4	55.6
INTELECTUAL	20.1	56.2
TOTAL MUESTRA	22.2	43.9

OCUPACION DEL ENCUESTADO Y DE SU PADRE	INFERIOR	SUPERIOR
OBRERO NO CUALIFICADO	12.5	31.2
OBRERO CUALIFICADO	19.7	36.9
TRABAJADOR NO MANUAL	31.2	33.7
INTELECTUAL	39.3	21.5
TOTAL MUESTRA	25.0	32.3

Las diferencias sociales entre las personas pertenecientes a los distintos grupos que se dan en la actualidad en Polonia, ¿son generalmente mayores o menores que antes de la guerra?



LA MOVILIDAD SOCIAL existente en Polonia después de la segunda guerra mundial ha mejorado su situación social, en opinión de la mayoría de los encuestados. Para muchos de ellos, pertenecientes a cuatro categorías ocupacionales, su nivel social es superior al que tenían sus padres (*cuadro superior*). Los propios encuestados que ocupan empleos de la misma categoría que los de sus padres responden, en general, que ha mejorado su posición social (*cuadro central*); el único grupo que no coincide con esta valoración es el de los intelectuales, definidos para los fines de este estudio como los profesionales y otras personas con formación superior. La generalizada sensación de movilidad ascendente se complementa con una impresión, todavía más acentuada, de que se han reducido las diferencias sociales entre los distintos grupos (*cuadro inferior*). El autor realizó este estudio por primera vez en el año 1961 con una muestra de unos 2000 hombres residentes en núcleos urbanos. En 1975, Elzbieta Otawoba repitió la encuesta.

pero adquiere un carácter primordial cuando el objeto en cuestión es mi propio hijo. La estratificación de los objetos según su importancia relativa es la dimensión fundamental de nuestros sistemas de valores.

Los valores pueden motivar una acción si la valoración de un objeto lleva a la conclusión de que es preciso intervenir activamente para mantener al objeto en condiciones adecuadas, para mejorarlo o para eliminarlo del terreno de nuestra experiencia. Sin embargo, la acción requiere otro tipo de consideraciones. Para decidirnos a actuar, tenemos que creer que contamos con alguna probabilidad de éxito, alguna posibilidad de desplazar al objeto en su espacio valorativo, aproximándolo al estado que corresponde a nuestras preferencias o criterios normativos. La probabilidad, tal como la percibimos, depende, necesariamente y en gran medida, de las limitaciones externas que pesan sobre nuestra libertad de acción, impuestas por el sistema social en que vivimos y por el lugar que estamos ocupando en él.

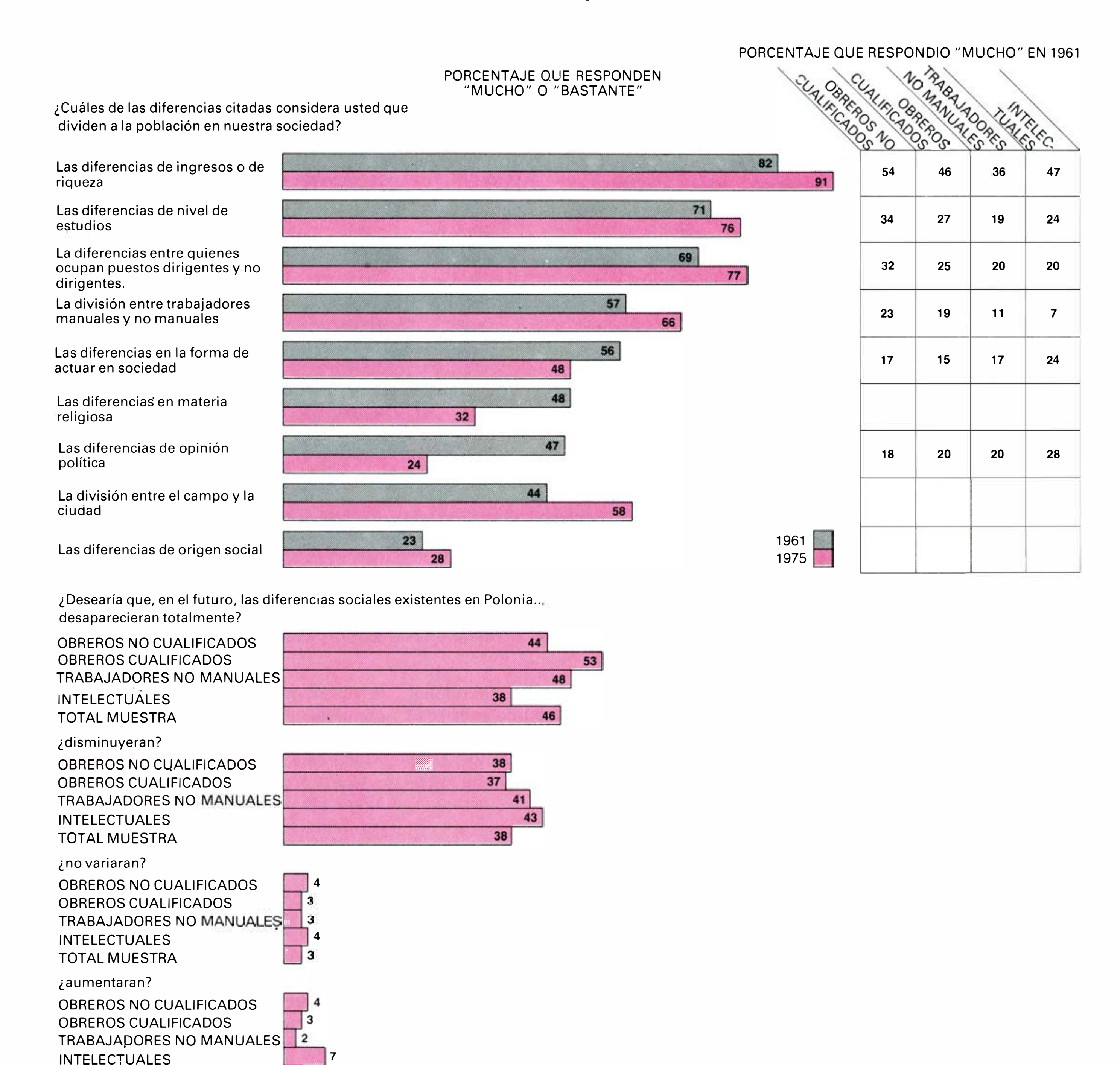
Cuando el éxito de una acción que nos dictan nuestros valores es improbable dada la sociedad o la situación en que vivimos, los valores pueden adquirir un carácter análogo a los genes recesivos, que existen pero no actúan. Se suscriben los valores, pero éstos no motivan la correspondiente conducta. Es perfectamente lícito preguntarse si estos valores "recesivos a nivel de conducta", que sólo describen lo que las personas querrían tener o lo que tienden a desear, constituyen un objeto aceptable de investigación sociológica. Por mi parte, me atrevería a opinar que plantean problemas significativos que merece la pena investigar. Están en la mente de las personas, son importantes para ellas e influyen sobre su estado de satisfacción con su propia vida y con el mundo que las rodea. Además, tam-

bién son dignos de estudio porque, como ocurre con los genes latentes cuando las condiciones son favorables, los valores latentes pueden convertirse en potentes factores motivadores del comportamiento humano, tanto a nivel del individuo como de la sociedad. La situación actual en Polonia parece un caso significativo en este sentido.

Cuando iniciamos nuestro primer estudio de actitudes y valores, en 1957 y 1958, obtuvimos sorprendentes resultados en lo referente a la estructura interna del sistema de valores observado. Encontramos lo que podríamos denominar un "agregado estadístico cuasialeatorio de valores y actitudes".

En primer lugar, al medir sobre una escala cuantitativa, o de prioridades, el grado de importancia que atribuían las personas a determinado valor, con frecuencia constatamos que la distribución de los resultados del conjunto de la población tendía a aproximarse a lo que en estadística se denomina distribución normal. Mientras que una distribución bimodal puede interpretarse como indicio de una polarización de las opiniones y valores dentro de una sociedad, la distribución normal indica que cuanto más extrema es una opinión, menor es el número de personas que la sustenta.

Nuestros datos también revelaron só-



VALORACION de las influencias divisorias que actúan sobre la sociedad polaca; demuestra ese criterio que algunos ideales igualitarios, compartidos desde hace mucho tiempo, no se han visto satisfechos. En 1961, más del 80 por ciento de los encuestados citaron las diferencias en el nivel de ingresos o de riqueza como una influencia divisoria; en 1975, la proporción había aumentado hasta más del 90 por ciento. Otros factores que influyen directamente sobre la posición social, como puede ser la educación recibida y el tipo de trabajo, también fueron citados con mayor frecuencia en el segundo estudio. Perdían importancia las diferencias en la conducta personal, las ideas religiosas y las opiniones políticas. Las respuestas a otra pregunta de la encuesta de 1961 indican que la mayoría considera que las diferencias sociales son demasiado grandes y muchos opinan que estas diferencias deberían desaparecer.

lo una escasa correlación entre los valores y las características demográficas de los encuestados. (Las diferencias según los estudios realizados y otros factores correlativos constituyen la excepción más visible a esta generalización.) En general, el conjunto de valores observado en un grupo determinado, aunque este grupo difiera de otro en un aspecto concreto, debe considerarse una modificación de la pauta generalmente imperante, más que como una característica específica del grupo. En resumen, es posible decir que en Polonia existe un único sistema y no diversos sistemas de valores.

Finalmente, con frecuencia observamos una escasa o nula correlación entre los diversos aspectos y dimensiones del sistema de valores, incluso en el caso de un individuo concreto. Es decir, los encuestados presentan conjuntos de valores con escasa coherencia interna; las opiniones no configuran un síndrome ideológico. Esto tiene una importante consecuencia social: si dos polacos comprueban que sus opiniones sobre determinado tema difieren muchísimo, pero prosiguen su conversación el tiempo suficiente, acabarán descubriendo que tienen puntos de vista parecidos sobre muchas otras cuestiones. Su contraste de pareceres raras veces les llevará a una confrontación en torno a distintas concepciones del mundo [*Weltanschauungen*].

La observación de estos agregados no estructurados produce la sensación de que los encuestados han absorbido, en cierto modo, cada valor y cada actitud por separado y al azar. La impresión de que nos hallábamos ante una absorción casi aleatoria de valores en libre circulación se vio reforzada por los estudios sobre los valores de los padres y de los hijos que realizamos a principios de los años 1970. No pudimos detectar ninguna diferencia generacional, ni tampoco encontramos ninguna correlación significativa entre los valores de los padres y los de sus hijos (con la nítida excepción de la religión, en cuyo caso existían fuertes correlaciones familiares). La identidad personal y de grupo parecía influir, como máximo, en la absorción de los valores, actuando a modo de débil filtro, pero no como un factor independiente capaz de configurarlos.

Esta no parece ser la situación habitual. Aunque no poseemos resultados de encuestas y datos sistemáticos comparables referidos a la sociedad polaca anterior a la Segunda Guerra Mundial, podemos deducir algunas cosas de los programas de los partidos políticos y de las estadísticas electorales. Esta información nos permite inferir que las opiniones sociales y políticas existentes en la sociedad abarcaban todo el espectro, desde la extrema izquierda hasta la extrema derecha. También podemos suponer que las opiniones de las personas correspondían, de manera sindromática, a los programas que propugnaban sus partidos políticos, aunque muy probablemente con una menor coherencia interna. Y también podemos aceptar un supuesto bastante corriente en sociología política, a saber, que las distintas clases y grupos sociales se caracterizaban por la posesión de distintos conjuntos de ideas sociales y políticas. Otro tanto, probablemente, debió ocurrir también en el período inmediatamente posterior a la guerra.

Para explicar la evolución, desde un sistema hipotético de valores como el descrito, hasta el que observamos a finales de la década de 1950, es preciso tener en cuenta las características más importantes de la transformación social y política experimentada por el país en los años que median entre uno y otro momento. Con el propósito de construir una sociedad socialista, los nuevos dirigentes políticos del país nacionalizaron la casi totalidad de la economía y eliminaron las clases de propietarios de grandes y pequeñas fábricas y, más tarde, incluso los de los pequeños talleres. La reforma agraria suprimió las grandes explotaciones agrícolas privadas y se dieron los primeros pasos hacia una colectivización, que luego se interrumpió y se revisó a partir de 1956. Ello determinó un incremento sin precedentes de la movilidad social, tanto horizontal como vertical. Horizontal porque la modificación de las fronteras nacionales hizo cambiar de residencia a millones de personas de este a oeste. Y fue vertical dadas las importantes bajas sufridas entre los intelectuales durante la guerra y debido a la industrialización, la urbanización y la expansión de la burocracia después de la guerra.

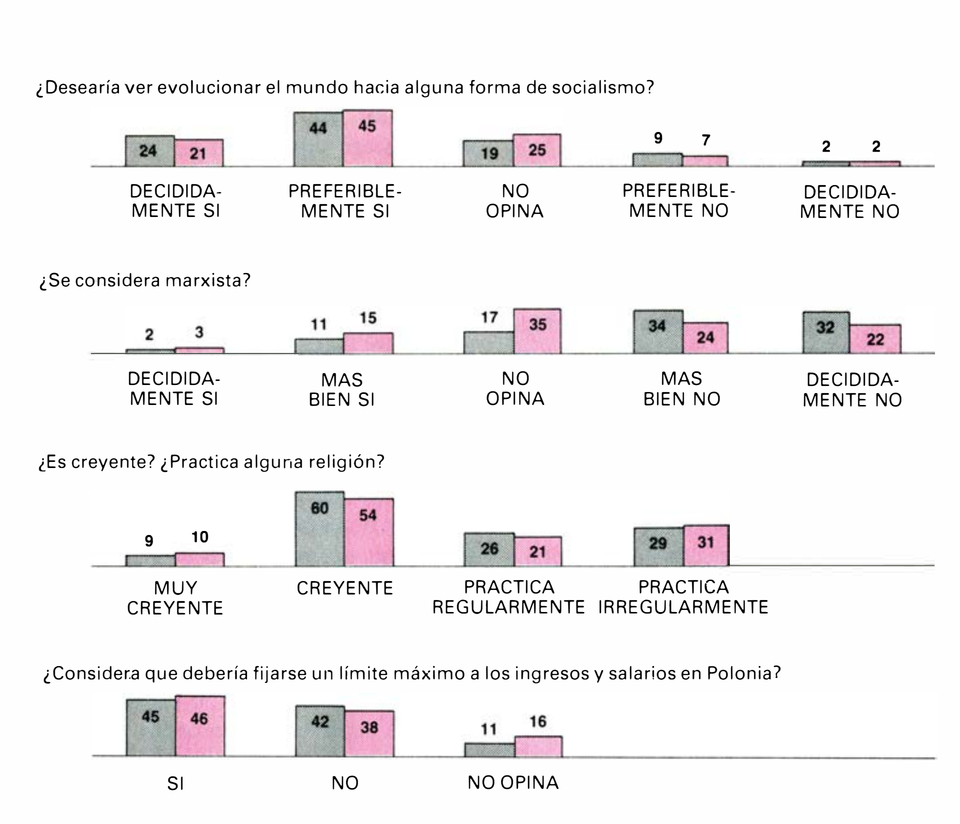
Todos estos procesos crearon gran número de vacantes en las capas superiores de la nueva estructura social y la movilidad ascendente predominó claramente sobre la movilidad descendente, sobre todo en los primeros años. Las ideas de los encuestados reflejaban marcadamente este proceso histórico. La mayoría estaban convencidos de que las diferencias entre capas sociales eran menores que antes de la guerra y la mayoría consideraban que su posición social era superior a la de su padre en la Polonia de preguerra. Esta sensación de promoción social no sólo la manifestaban, las personas con un nivel ocupacional superior al de sus padres, sino también aquellas que no habían ascendido en la escala social, prueba del movimiento ascendente de estratos sociales completos.

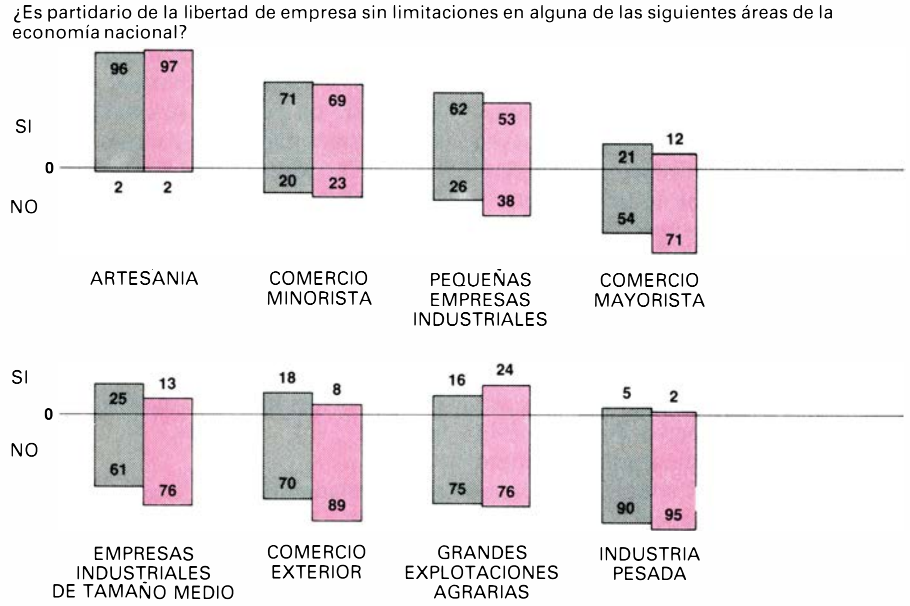
Las nuevas autoridades dirigieron el movimiento ascendente, teniendo en cuenta el origen social de los candidatos a una promoción y concediendo prioridad a las gentes de clase más baja. Las autoridades también valoraron la fidelidad política como criterio de promoción dentro de la nueva estructura de poder. Estos procesos conmovieron de arriba abajo toda la sociedad.

A todo lo cual debe sumarse la transformación política de la sociedad como explicación de la homogeneización de los valores y actitudes en Polonia. Primero se suprimieron todos los partidos políticos y organizaciones que no se identificaban con el "Bloque democrático" encabezado por el Partido Obrero Polaco. Luego, a partir de 1948 y de la fusión de los partidos socialista y comunista para formar el Partido Obrero Unificado de Polonia, se estableció un sistema más rígido de control político sobre la conducta y el pensamiento de los ciudadanos. Se eliminaron de la vida pública las ideologías o filosofías discrepantes (a excepción del catolicismo, que quedó circunscrito a las iglesias). El nuevo régimen, con su monopolio sobre los medios de comunicación de masas, emprendió el adoctrinamiento de la población en la ideología marxista.

Los estadounidenses emplean la metáfora del *melting pot* (crisol de razas) para caracterizar la mezcla e intercambio de valores de diverso origen étnico hasta configurar una pauta homogénea. Una metáfora más apropiada para el período stalinista de la historia de Polonia sería la del molino de harina. En mi opinión, ese molino es el origen del "agregado estadístico cuasialeatorio de valores y actitudes" que observamos a partir de 1956.

Por lo que respecta al contenido de los valores de las personas, en contraposición a lo que sería la estructura formal, estadística, del sistema de valores, nuestras encuestas de finales de la década de 1950 y principios de la del 60 revelaron que "el experimento de aprendizaje social a escala nacional", puesto en práctica por el nuevo régimen, había dado ciertos resultados. La población aceptaba las grandes transformaciones de la organización social y





PARA EL CONJUNTO DE VALORES del pueblo polaco no puede señalarse una única fuente ideológica. Estos datos corresponden a los estudiantes de Varsovia en 1958 (*gris*) y 1978 (*color*). La mayoría de los estudiantes se declaran partidarios de "alguna forma de socialismo" y apoyan medidas políticas asociadas al socialismo, como la limitación de las rentas más altas. Por otra parte, son pocos los que se identifican como marxistas y muchos son religiosos. Las empresas privadas se consideran apropiadas en algunas áreas de la economía nacional, pero no en las más esenciales. Las opiniones sobre la mayoría de estos temas se han mantenido estables. La serie de preguntas fue formulada a los estudiantes de Varsovia en tres fechas distintas: en 1958 por Zöfia Józefowicz, el autor y Anna Pawelczyńska; en 1961 por el autor, y en 1978 por el autor con la colaboración de Grzegorz Lindenberg, Pawel Karpowicz y Krzyszof Nowak.

económica de la sociedad: la nacionalización de la industria, la reforma agraria, la planificación económica y la abolición de la estructura de clases existente antes de la guerra. Como reflejo de la intensa propagación de la ideología igualitaria durante ese período de formación, la población también hacía suya la idea de la igualdad de oportunidades para todos los ciudadanos e incluso la idea de la concesión de oportunidades preferentes a los más desfavorecidos. Su igualitarismo era más moderado en lo tocante a la distribución de la renta; la mayoría aceptaban una cierta desigualdad. Aunque la diferencia que consideraban moralmente aceptable entre los niveles superiores e inferiores de ingreso resultaría bastante radical según los criterios imperantes en la Europa occidental. En efecto, la mayoría de los encuestados opinaban que la estratificación social de la Polonia socialista no era suficientemente igualitaria. La mayoría compartían también la bastante firme convicción de que la responsabilidad de equiparar las oportunidades de vida, de favorecer el desarrollo del potencial de todos los ciudadanos y de satisfacer las necesidades básicas de la población recaía sobre el conjunto de la sociedad y, en particular, sobre el Estado.

Estas eran las ideas que la población asociaba al "socialismo", inmediatamente después de 1956, cuando Wladyslaw Gomulka subió al poder. Siguiendo la línea marcada por la nueva dirección del partido, los encuestados insistían en que eran partidarios de "la vía polaca al socialismo". Esta se concretaba en la democratización del sistema político, la supresión de las restricciones más drásticas de los derechos de los ciudadanos y su principal motivo de temor, la promoción de la libertad de palabra y expresión, una mayor influencia del pueblo en el gobierno y la participación de los consejos obreros en la administración de las empresas, siguiendo el modelo yugoslavo. "La vía polaca al socialismo" también estaba impregnada de los sentimientos patrióticos que el pueblo alienta hacia la nación como algo distinto del Estado.

La mayoría de la gente que apoyaba este tipo de socialismo no identificaba sus ideas con el marxismo; sólo un 2 por ciento de los estudiantes universitarios que encuestamos en Varsovia, en 1958, se declararon "decididamente marxistas" y sólo un 11 por ciento se calificaron como "marxistas moderados". Simultáneamente, nuestros estudios revelaron la persistencia de los sentimientos religiosos. Gomulka tuvo que enfrentarse con una prueba de ello pocos días después de su subida al poder. Millares de personas se congregaron frente al edificio del Comité Central del Partido para exigir la inmediata liberación del Cardenal Wyszynski, que permanecía detenido desde 1953. Por otra parte, la religiosidad tradicional de los polacos, que acentúa más el ritual que la experiencia espiritual o las preocupaciones morales, coexiste sin demasiados problemas con casi todos los demás valores dentro de la pauta de asociación al azar actualmente vigente. El hecho de que una persona sea religiosa apenas influye sobre su aceptación de la economía nacionalizada, de la igualdad social o de "alguna forma de socialismo".

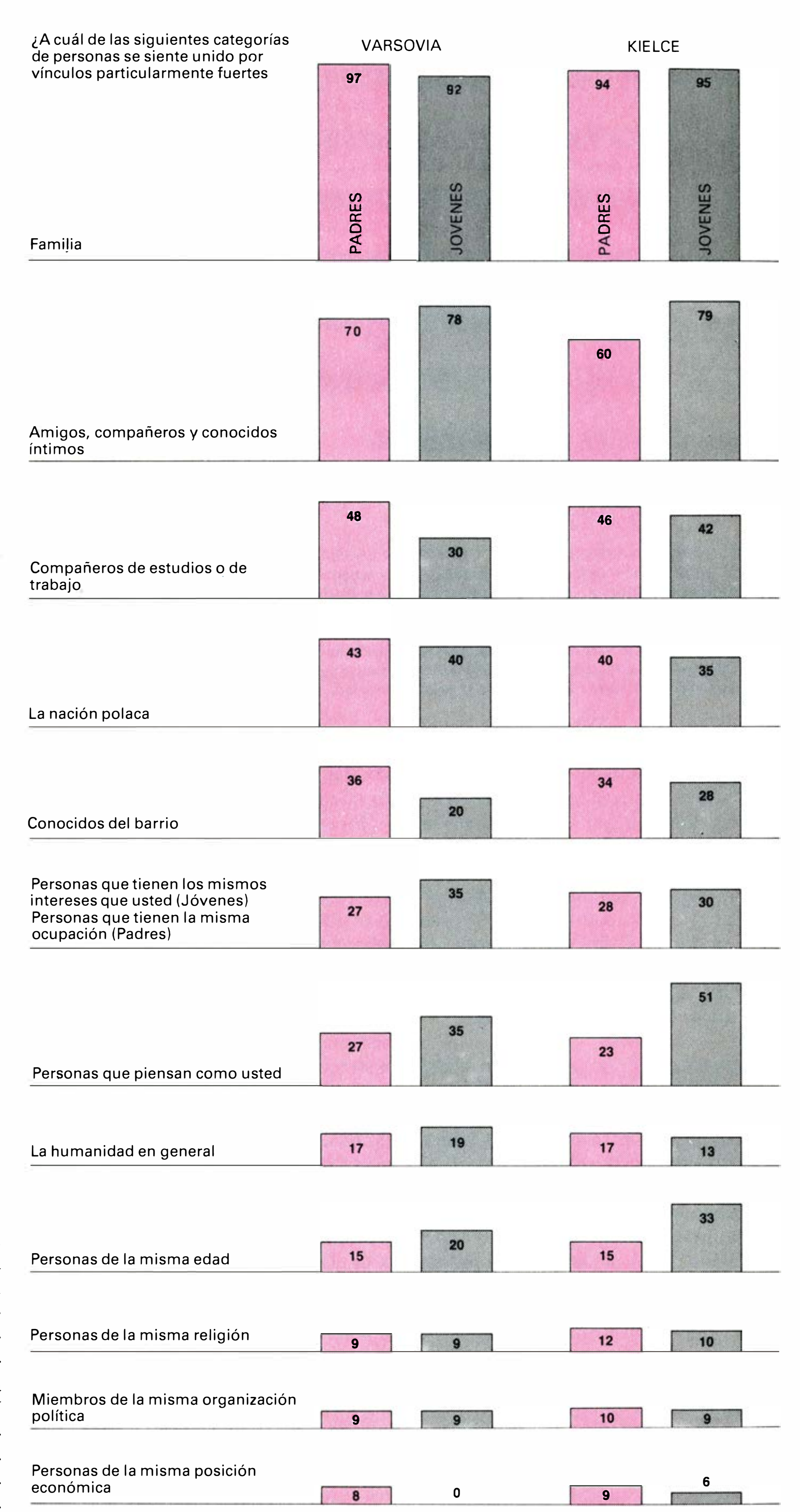
En general, puede decirse que el sistema de valores que observamos a finales de los años 1950 había surgido de la interacción de los valores propagados por el nuevo sistema con valores que subsistían en algún profundo rincón de la mente de la población. La síntesis empezó a presionar el curso de los acontecimientos, a nivel nacional, alrededor de 1956.

Durante los siguientes 25 años, Polonia tuvo una historia cargada de acontecimientos. La austeridad impuesta por Gomulka y el generoso programa de inversiones del gobierno de Edward Gierek culminaron, en 1979 y 1980 respectivamente, en crisis económicas que llevaron a los obreros a la huelga. Polonia vivió protestas y manifestaciones estudiantiles en 1968 y una oleada de contestación política de los estudiantes e intelectuales en la década de 1970. Hubo períodos de relativa libertad política después del acceso al poder de un nuevo equipo de gobierno, seguidos de un endurecimiento del control político. A partir de 1976 surgió un nuevo fenómeno: grupos de oposición política que actuaban abiertamente y la publicación de libros y periódicos no sometidos al control de la censura.

Mientras tanto, la estructura social experimentó una acusada transformación con la polarización de las condiciones económicas en que vivía la población. Aumentó el número de aquellos que, en una sociedad socialista igualitaria, eran "más iguales que los demás". Sobre todo en los últimos años del gobierno de Gierek, se desarrolló un nuevo estilo de consumo ostensible que proclamaba la presencia en la sociedad de gentes que podían permitirse ese lujo.

Teniendo en cuenta todos estos antecedentes, ¿qué cambios detectaron, en el sistema de valores de nuestros conciudadanos, nuestros estudios más recientes? La respuesta es sencilla: ¡Casi ninguno! En nuestras encuestas a muestras comparables de la población algunos o varios años más tarde, siempre que repetíamos un conjunto de preguntas relacionadas con los valores sociales, obteníamos esencialmente la misma distribución de las respuestas. Y dado que la relación entre valores y características de grupo seguía siendo escasa, ni siquiera el carácter de las muestras comparadas tenía mayor relevancia; la distribución de las respuestas a las preguntas relacionadas con los valores era casi idéntica en la mayoría de los estudios.

En 1978 repetimos el estudio realiza-



JERARQUIA DE LOS VINCULOS SOCIALES. Constituye una dimensión fundamental de cualquier sistema de valores. La familia ocupa el primer lugar en Polonia, como en todo el mundo. Aparte de la familia, los encuestados en el estudio sobre las "diferencias generacionales", de 1972-74, manifestaron fuertes vínculos con sus amigos y compañeros y con la nación polaca en general. Se detectó una notable ausencia de instituciones sociales aglutinantes a un nivel intermedio entre el círculo de amigos y la nación. Este vacío parece haberse llenado durante el pasado año con el desarrollo espontáneo de Solidaridad.



LA FRUSTRACION CON RESPECTO A LOS IDEALES SOCIALES explicaría la distinta distribución de las respuestas a una pregunta, que figuraba en las encuestas de 1958 y 1978, sobre los valores de los universitarios de Varsovia. Durante esos 20 años, la proporción de estudiantes que aprobaba la idea de que se debía arriesgar la propia vida por diversas causas bajó en todos los casos, salvo uno: la defensa de la patria. Puesto que otros resultados de la encuesta indican una escasa variación en los valores de los estudiantes, la menor voluntad de arriesgarlo todo puede interpretarse como una consecuencia de su frustración ante la incapacidad de la sociedad para adecuarse a sus valores. Esta frustración parece haber sido una importante fuerza impulsora de la reestructuración, o "reintegración", de la sociedad polaca.

do en 1958 sobre los valores y actitudes sociales y políticas de una muestra de estudiantes universitarios de Varsovia, seleccionados al azar. Al comparar las respuestas a las mismas preguntas, con 20 años de diferencia, no se detecta casi ningún cambio significativo. Ideológicamente, los estudiantes de 1978 eran casi idénticos a sus equivalentes de 1958, algunos de los cuales ya ocupaban entonces cargos en el gobierno, la economía, la cultura y la ciencia.

Impresionados por la estabilidad del sistema de valores de nuestros compatriotas durante esos veinte años, decidimos examinar la dimensión básica de todo sistema de valores, esto es, el orden jerárquico en que las personas clasifican los objetos de sus valores. Dado que los polacos son gentes como las demás, es de suponer que la propia persona ocupa el primer lugar dentro de la jerarquía. Nuestros estudios revelaron que, prácticamente en todos los casos, a continuación le sigue la familia. Esta institución puede considerarse, hasta cierto punto, como una extensión del propio yo en todos los grupos sociales y en todas las generaciones. Después de la familia, en nuestros estudios venían los amigos, desde los amigos íntimos hasta el círculo más amplio de compañeros de colegio y de trabajo. Para sorpresa nuestra, constatamos que, para un polaco, el grupo más importante después de éstos es el conjunto de la nación polaca. Ello concuerda con el estereotipo del patriotismo polaco, que resulta ser mucho más válido de lo que hubiera cabido esperar.

En consecuencia, la estructura social de la sociedad polaca, según la visión subjetiva de sus miembros, parece corresponder a una "federación" de grupos primarios unidos en una comunidad nacional. Evidentemente, en la realidad, la estructura social objetiva de Polonia es tan compleja como la de otras sociedades industriales. Posee un sistema plural que comprende la administración pública nacional, empresas industriales de estructura análoga a las sociedades anónimas, organizaciones políticas, asociaciones profesionales, sindicatos estatales oficiales, etcétera. Pero ninguna de estas instituciones parece despertar, a nivel de masas, el tipo de identificación que se evidencia con toda claridad en las encuestas cuando el entrevistado responde "nosotros". Al contrario, muchas de las instituciones evocan sentimientos expresados mediante la palabra "ellos", incluso entre personas que trabajan en ellas o pertenecen a las mismas. Nuestros estudios revelaron, por tanto, la existencia de un cierto vacío social entre el nivel de los grupos primarios y el de la nación.

Igualmente, nuestros estudios también revelaron importantes cambios en la valoración que hacían las personas de los objetos a los que "aplicaban" sus sistemas de valores, estables en otros sentidos; y, en particular, cambios en el nivel de satisfacción con sus condiciones de vida y con la actuación de los gobernantes del país. Su insatisfacción se ha agravado con la escasez de bienes de consumo de los últimos años. Combinadas con una escasez de viviendas que ha impedido a muchos poseer un piso de propiedad, estas circunstancias han inducido en la población una valoración negativa y muy emocional de sus propias condiciones de vida. El contraste del ostentoso consumo de quienes tienen medios para permitírselo ha hecho más dolorosa la frustración de los demás y ha favorecido su condena de la situación, que consideran contraria a los criterios socialistas de igualdad social. Los estudios realizados en 1961 y en 1968 revelaron que una gran mayoría consideraba las disparidades en los niveles de ingresos y de riqueza como el principal factor de división de la población y una fuente fundamental de tensiones sociales.

En este contexto, sin embargo, observamos que las actitudes de una persona con respecto a la igualdad económica iban muy ligadas a su propia posición económica. Las personas que gozaban de unos ingresos elevados y de una situación privilegiada manifestaron mucha mayor comprensión de la necesidad de una diferenciación de los ingresos y de la existencia de privilegios que quienes no gozaban de esas ventajas. Esto explica nuestra observación, antes citada, en el sentido de que las personas con mayor nivel de estudios manifiestan opiniones menos igualitarias, puesto que en la sociedad polaca cada vez es mayor la relación entre el nivel de educación y los ingresos. Las personas con un mayor nivel de estudios y una posición económica desahogada concilian esta actitud con sus opiniones "prosocialistas", afirmando que la consecución de una sociedad más igualitaria está reservada a las generaciones futuras. Algunos rechazaban este ideal incluso para el futuro, pero no veían ninguna contradicción entre esta actitud y su aceptación del socialismo. Por otra parte, las mismas personas manifestaron un fuerte aprecio por diversos valores democráticos. En consecuencia, cuanto más elevada era la posición de los encuestados dentro de la escala social, más democráticas y menos igualitarias eran sus opiniones.

Constatamos que un importante valor democrático, la libertad de expresión, era más apreciado por los obreros, y en particular por los obreros altamente cualificados, que incluso entre las personas con formación universitaria. Al mismo tiempo, los obreros altamente cualificados manifestaron acti-

tudes más igualitarias en cuanto a la diferenciación de los ingresos y a los privilegios. Pienso que esto explica, hasta cierto punto, por qué los obreros cualificados constituyen en estos momentos la principal fuerza social en Polonia, con sus reivindicaciones de justicia social y económica y también de libertad de expresión.

Entre la década de 1950 y la de 1970 cambiaron también otros aspectos de la realidad psicosocial. Un estado de ánimo de creciente irritación, que casi podía palparse en el aire, se generalizó entre la población, sobre todo en los últimos años del régimen de Gierek. La clásica combinación de frustración y agresividad se manifestaba en la actitud punitiva e intolerante hacia la desviación social. Nuestros estudios revelaron un menor interés por las cuestiones sociales en general y un mayor interés por los asuntos privados y personales, una "reprivatización" de la ideología, acompañada de apatía y de franco cinismo. Los coches y las fincas de verano se convirtieron en temas favoritos de conversación entre los intelectuales.

Este desplazamiento en las actitudes de la población quedó sorprendentemente reflejado en nuestras encuestas a los estudiantes universitarios de Varsovia. En 1958, éstos respondieron a la pregunta siguiente que les formulamos: "un individuo debería estar dispuesto a dar su vida por diversas causas: la vida humana, la familia, los amigos, la verdad, la dignidad humana, la patria, la religión y, en menor grado, la ideología social". La disposición oscilaba entre un 94 por ciento (la vida humana) y un 32 por ciento (la ideología social), con un promedio del 67 por ciento. Veinte años más tarde, los porcentajes se habían reducido mucho y la disminución era particularmente acusada en el caso de valores tales como la dignidad humana, la religión y la ideología social. El porcentaje de estudiantes dispuestos a arriesgarlo todo por la vida humana y por la familia también había disminuido, pero un valor no perdió terreno: la patria, con un 82 por ciento en una y otra encuesta.

Fuera de esa afirmación de patriotismo, la apatía ya observada en la sociedad polaca quedó patente en este estudio y, de hecho, afectaba a una parte importante del sistema de valores de los estudiantes. Los estudiantes de 1978 constituían una población completamente distinta de la de 1958, en lo referente a la importancia subjetiva de la mayoría los de valores extrapersonales. Pero, en cambio, coincidían casi por completo con sus compatriotas de veinte años atrás, en lo referente al tipo de sociedad en que les gustaría vivir. Sólo que sus aspiraciones y deseos, en ese ámbito, simplemente eran menos intensos y menos importantes para ellos. A finales de la década de 1970, el pueblo polaco manifestaba crispación política y apatía social al mismo tiempo. Esta combinación se volvería explosiva algunos años más tarde.

La rapidez con que 10 millones de polacos se unieron en el movimiento Solidaridad constituye una prueba de la intensidad de las necesidades que satisface el movimiento. El pueblo ve en los nuevos sindicatos libres un instrumento necesario para la consecución de importantes objetivos sociales e individuales. Pero considerar estos sindicatos como meras asociaciones instrumentales sería menoscabar mucho su verdadera naturaleza; en efecto, al menos de momento, constituyen agrupaciones dotadas de un particular valor de satisfacción emocional. La rapidez con que se han desarrollado demuestra también el grado de frustración existe en medio del vacío social del período anterior, así como la necesidad de integración que sienten muchísimas personas y su deseo de sentirse apoyadas por los demás.

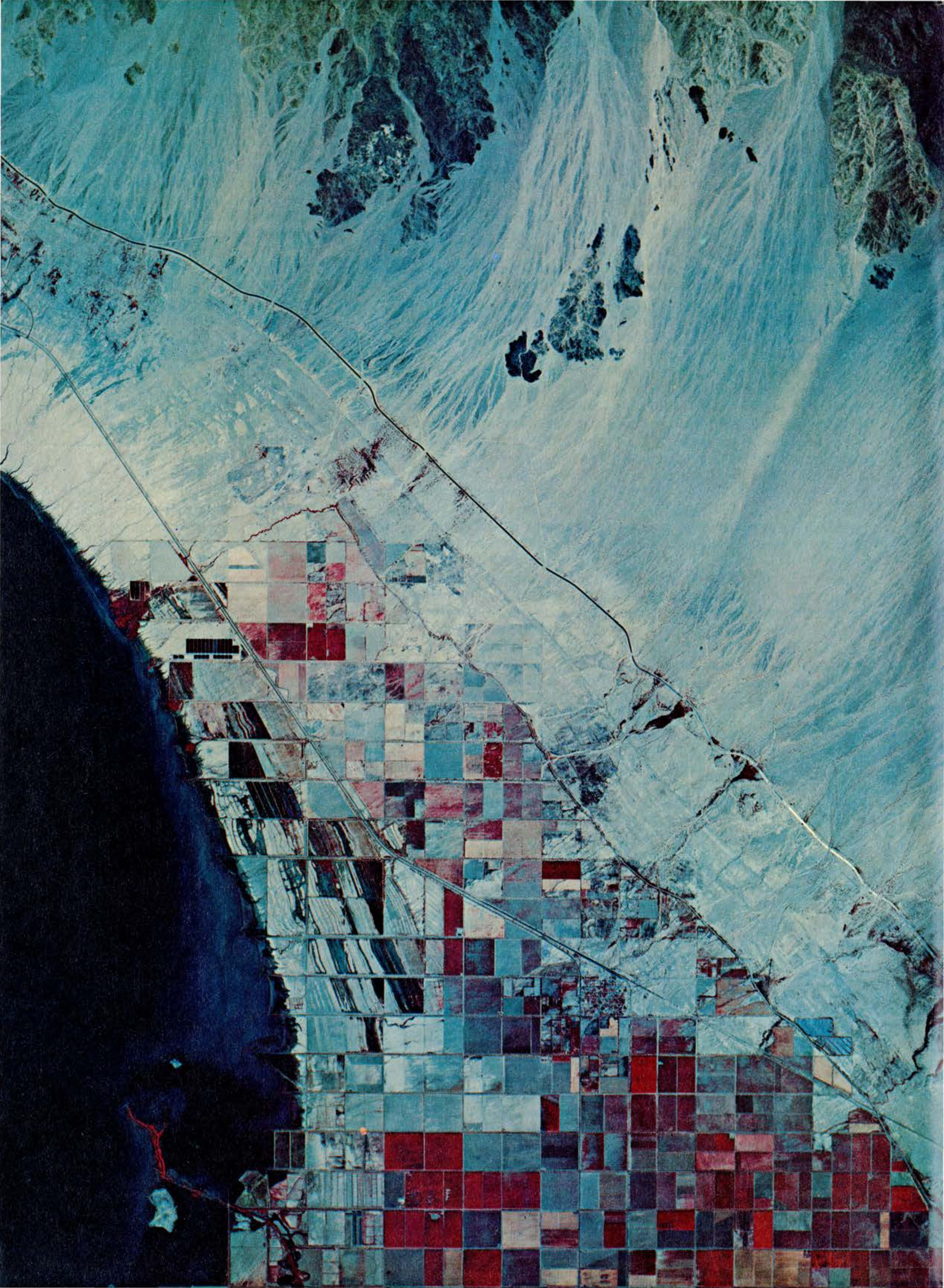
El proceso de reintegración de la sociedad puede observarse también en otros grupos sociales, como pueden ser los campesinos y los estudiantes. Muchas de las organizaciones formales ya existentes están experimentando un renacimiento democrático. Así, por ejemplo, muchas asociaciones están eligiendo sus propias juntas directivas y están definiendo sus líneas y campos de actuación a través de procedimientos democráticos, no sometidos a ningún control externo; los miembros de estas organizaciones llenan de este modo su propio vacío social, infundiéndoles un nuevo significado social.

A través de la unión y la organización, la población también pierde lo que podríamos denominar complejo de liliputienses frente al gigante. Comprueban que los sindicatos recién formados, y las organizaciones gestionadas democráticamente, les permiten influir sobre los acontecimientos incluso a nivel nacional. Pierden la sensación de impotencia y la sustituyen por un sentimiento de dignidad. Existen conceptos importantes difíciles de medir con series de indicadores, pero que son necesarios para comprender algunas situaciones sociales. Es imposible comprender los acontecimientos de Polonia sin referirse a la recuperación de la dignidad humana.

La observación de la vida cotidiana durante los últimos meses en Polonia indica que buena parte de la irritación y agresividad interpersonales han desaparecido. Las gentes se tratan con amabilidad, incluso en las aglomeraciones del tranvía de las seis de la mañana o en las largas colas que se forman frente a las tiendas. Si estudios sistemáticos confirman la desaparición de los síntomas de frustración y agresividad, se habrá demostrado que la población está viendo satisfechas algunas necesidades esenciales. Puesto que estas necesidades no pueden ser económicas (en este sentido la situación es más frustrante ahora que antes), debemos buscar otra explicación. Tal vez acabaremos por encontrarla en la reintegración de nuestra sociedad atomizada, en la eliminación del sentimiento de impotencia y en el restablecimiento de la dignidad personal.

Ahora la población puede manifestarse públicamente y trabajar para conseguir toda la lista de valores que le gustaría ver materializados en un sistema social "bueno" y "justo". Consideremos, por ejemplo, la jerarquía de valores que observamos en nuestros estudios de 1972-74 sobre la "diferencia generacional", una lista similar a la obtenida en muchos otros estudios. Los primeros conceptos de la lista son la "Igualdad de oportunidades", la "Satisfacción de las necesidades básicas de la población", la "Libertad de expresión" y la "Influencia de los ciudadanos en el gobierno de la sociedad". Cualquiera que haya seguido el desarrollo de los acontecimientos en Polonia sabe que estos valores también ocupaban los primeros lugares en la lista de reivindicaciones de los obreros durante las huelgas del verano y otoño pasados. Ahora se hallan inscritos en los acuerdos firmados por el gobierno con los miembros del sindicato Solidaridad para poner fin a las huelgas. Un sondeo nacional de opinión, realizado en otoño de 1980, reveló la misma lista de valores esencialmente en el mismo orden. Desde un punto de vista metodológico, puede decirse que la historia ha ratificado los datos de nuestras encuestas a nivel de actitudes.

Quienes han venido estudiando los valores y las actitudes en la sociedad polaca han estado investigando de hecho fuerzas sociales de enorme importancia. Estas fuerzas se configuraron, al menos en parte, bajo la influencia del sistema social, pero ahora determinan la forma del propio sistema y, al menos en cierto grado, han provocado su transformación.



La salinidad de los ríos

Los ríos vierten al océano las sales que se disuelven de las rocas. Cuando se aprovecha su curso para el riego, la evapotranspiración concentra las sales en el suelo, creando problemas en la agricultura

Arthur F. Pillsbury

Muchas civilizaciones antiguas surgieron a raíz del encauzamiento de los cursos fluviales y del aprovechamiento de sus aguas para el riego de zonas áridas donde cosechar luego. El éxito del proyecto dependía de que los habitantes aprendieran a trabajar mancomunados hacia un mismo fin. De los sistemas antiguos, el más productivo se desarrolló en el extremo sudeste del Creciente Fértil, el ancho valle formado por el Tigris y el Eufrates en lo que ahora es Irak. Desde ahí, la civilización se propagó hacia el este, avanzando hacia Irán, Afganistán, Paquistán, India y, más tarde, a China, allí dondequiera los ríos discurrían por valles de suelos formados por depósitos aluviales recientes. En la cima de su productividad, las regiones de regadío mantenían, probablemente, a más de un millón de habitantes cada una. Todas esas civilizaciones terminaron extinguiéndose, y siempre por la misma razón: la tierra se tornó salobre, inadecuada para la siembra. Las sales disueltas, procedentes de la meteorización de las rocas de las más altas elevaciones, se concentraron en los campos de regadío a medida que el agua desaparecía, por evaporación, de la superficie y, por transpiración, de las hojas de las plantas sembradas. Aunque las inundaciones, plagas y guerras se cobraron su tributo, la última razón de que las civilizaciones basadas en el riego de las tierras desaparecieran yace en la salinización de éstas.

De ese destino fatal sólo se ha librado una notable excepción: el valle del Nilo, en el extremo oeste del Creciente Fértil. ¿Por qué? Pues debido a que sólo hasta tiempos muy recientes no se practicaba allí un riego propiamente dicho. La crecida anual del Nilo inundaba una ancha franja de tierra, extendida a lo largo del valle, que depositaba, año tras año, una nueva capa de suelo fértil. Estas inundaciones impedían la acumulación de sales; al infiltrarse en el suelo, el agua las lixiviaba y las transportaba hacia las aguas subterráneas, que terminaban por drenar el propio lecho del río. Se alcanzaba así, más o menos automáticamente, un balance de sales; iban éstas a parar al Mediterráneo, siglo tras siglo, como ocurría ya milenios antes de los albores de la agricultura. Con la construcción de la presa de Asuán, en la cabecera del Nilo, y la introducción del sistema normal de riego, Egipto se enfrenta ahora con el problema universal de la acumulación de sales en los campos de regadío.

Los cultivos de regadío presentan muchas ventajas sobre la agricultura de las regiones húmedas, a pesar del elevado coste del agua y de su distribución. Los campesinos obtienen dos o más cosechas por año de ciertas plantas de crecimiento rápido, tales como cereales y legumbres. Cabe esperar, además, que un clima seco rebaje los costes de siembra, cultivo, limpieza, recolección y control de las enfermedades e incremente la producción y la calidad. El agua puede suministrarse siempre que sea necesario, para recoger una cosecha óptima. Por encima de todo, se dispone ya de tecnología suficiente para resolver el problema de la salinización y practicar una agricultura de regadío permanente, en el sentido literal del término. Describiré aquí esa tecnología, en función de su aplicación en los estados occidentales de la Unión, donde se practica el riego intenso desde principios de siglo.

Todas las aguas naturales, incluidas las llamadas dulces, contienen sales. Un manantial virgen, al manar de una montaña, puede llevar sólo 50 partes por millón (p.p.m.) de "sales" o sólidos disueltos (sólidos totales disueltos). La media de las aguas oceánicas se cifra en torno a las 35.000 p.p.m., un 3,5 por ciento, de sólidos disueltos. No me refiero sólo, por supuesto, a la sal común de mesa, el cloruro sódico. La sal de mesa, la más soluble de todas las sales comunes, constituye cerca de un tercio del total de las sales que hay en el agua de mar. Hay también muchas otras sales en las aguas naturales. Predominan los carbonatos, los cloruros y los sulfatos de calcio, magnesio y sodio.

Si aceptamos la estimación comúnmente citada de que las cuencas oceánicas contienen 1320 millones de kilómetros cúbicos de agua salada, con una concentración promedio de 35.000 p.p.m. de sólidos disueltos, hay alrededor de $3{,}2 \times 10^{18}$ toneladas de sal en todos los océanos del mundo. Hay, además, grandes cantidades de sal, fundamentalmente en forma cristalina, en los continentes, o rellenando cavidades antiguas. Estos depósitos de sales son un resultado de los diversos procesos geológicos que resume el término meteorización.

La meteorización tiene lugar bajo condiciones tales que posibilitan la oxidación de los cristales de los minerales que constituyen la roca. Aunque la me-

YUXTAPOSICION FORTUITA del valle Imperial y del mar de Salton en el sudeste de California, cerca de la frontera entre los Estados Unidos y México. Permite llevar las aguas salobres drenadas desde los campos de regadío hasta una laguna natural de 950 kilómetros cuadrados de superficie, casi tan salada como el océano. Esta fotografía, tomada desde un avión U-2, al servicio de la National Aeronautics and Space Administration, desde una altura de 20.000 metros, recoge sólo la punta del extremo nororiental de las 200.000 hectáreas que posee el valle Imperial, la mayor extensión de regadío del hemisferio occidental. La vegetación, intenso reflector de rayos infrarrojos, aparece en un tono rojo brillante en la película infrarroja Aerochrome usada para la fotografía. El agua destinada al riego se transporta, a lo largo de 130 kilómetros, desde el río Colorado, en el canal All-American [*véase el mapa de la página siguiente*]. El canal All-American abastece al canal East Highline (que se aprecia inmediato a los campos de cultivo, a lo largo del mar de Salton) y al canal Coachella, ligeramente al este, que cruza la fotografía, en diagonal, desde la parte superior izquierda hasta la inferior derecha. El canal Coachella transporta agua del río Colorado otros 200 kilómetros hasta la zona de regadío que se encuentra al norte del mar de Salton.

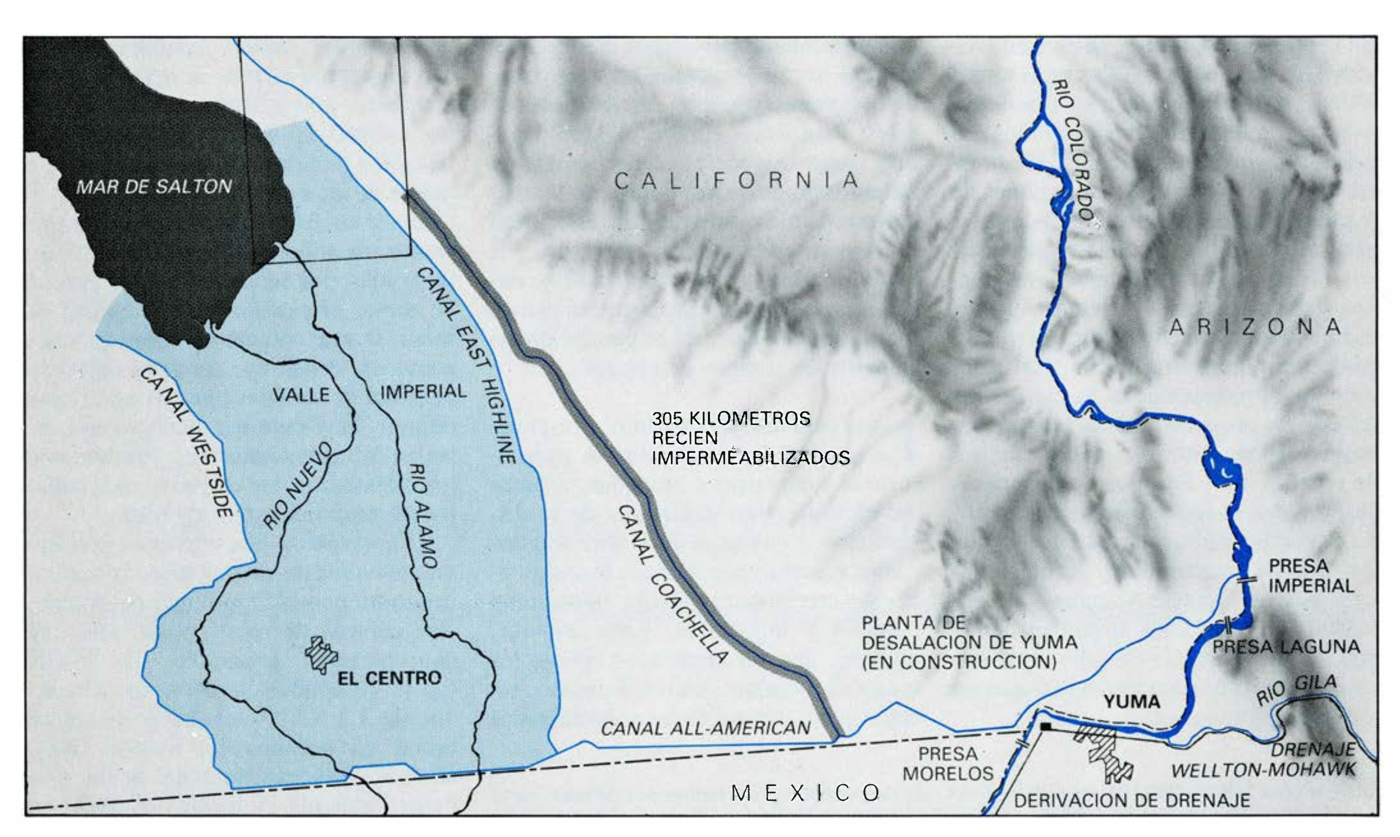
teorización engloba procesos físicos, químicos y biológicos, los físicos son los principales por su generalidad e importancia. La acción mecánica fractura la roca, exponiendo a los agentes de meteorización un área superficial mucho mayor. Así, el hielo y el deshielo alternativo del agua introducida en las grietas de las rocas ejerce fuerzas de compresión y expansión que pueden fracturar el más fuerte de los materiales. El agua fluyente, el viento y la acción de molienda de las rocas en el lecho de los arroyos y en el fondo de los glaciares contribuyen a la meteorización física. La meteorización aporta sales y partículas de roca que se transportan desde las tierras altas hasta las llanuras, donde pasan a formar parte de los principales constituyentes del suelo.

Las fuerzas físicas actúan con mayor energía en los puntos más altos, donde son máximas. De ello resulta que la meteorización y la consecuente producción de sales alcanzan sus valores más altos en las cotas más elevadas. Componente esencial del proceso de meteorización es el agua de precipitación, que disuelve las sales. Por ello, en zonas de gran precipitación, las sales tienden a estar diluidas.

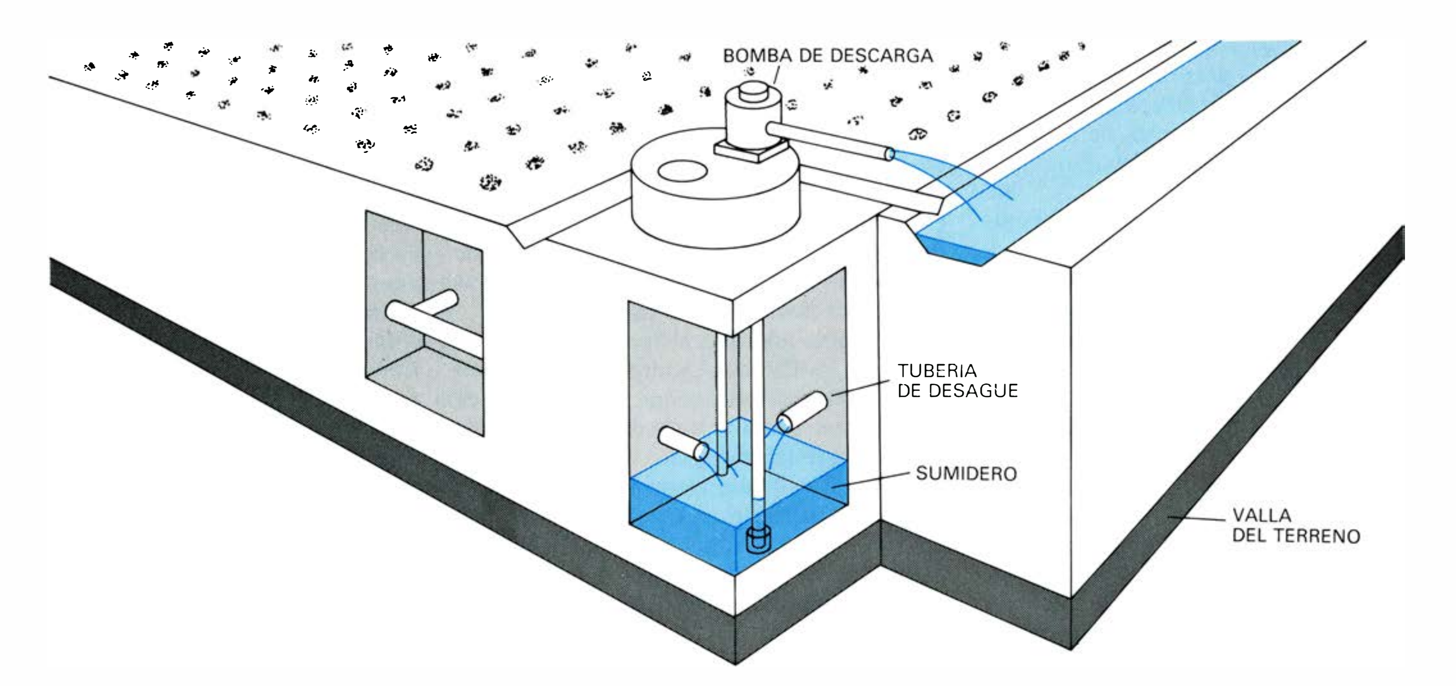
Cuando llueve o nieva, el agua se infiltra, en su mayor parte, en el suelo. El exceso que sobrepasa la capacidad de retención de agua que tenga el suelo suele formar una capa freática a cierta profundidad. Al final de este proceso, el agua caída brota en arroyos o reaparece en superficie a través de manantiales. Este flujo es el que hace que los arroyos y las fuentes persistan mucho más que lo que podría esperarse de la naturaleza intermitente de las precipitaciones.

En buena proporción, el agua retenida en el suelo y en la franja capilar suprayacente a la capa freática (la zona donde puede impulsarse el agua hacia arriba desde la capa freática por acción capilar) es aprovechada por las raíces de las plantas, que la toman mediante el proceso de ósmosis. La mayor parte del agua que captan las raíces se transpira a través de las hojas de las plantas y pasa, en forma de vapor, a la atmósfera. El agua se evapora también, directamente, de la superficie del suelo. Cuando cambia la presión barométrica o el viento induce cambios transitorios en la presión, el suelo "respira". Puesto que, a ras de suelo, el aire está casi siempre saturado de humedad, la respiración representa una evaporación adicional. No es práctico, pues, determinar, por un lado, la cantidad de humedad del suelo que se pierde por evaporación y, por otro, la que se pierde por transpiración; de ahí que se considere la pérdida total de la superficie del suelo más la de la vegetación, globalidad que recibe el nombre compuesto de evapotranspiración.

Hay evaporación directa también del agua superficial de riachuelos, ríos, lagos, pantanos, canales y albercas. El resultado de todos los procesos evaporativos es la destilación de agua pura de la fase líquida, dejando las sales en el agua no evaporada. Si tenemos presente que la mayoría de las cuencas del oeste de los Estados Unidos se hallan completamente cubiertas de una vegetación densa, comprenderemos que la



EL CANAL ALL-AMERICAN nace en un embalse anterior a la presa Imperial, en el curso del río Colorado. Con 130 kilómetros de longitud, acarrea las dos terceras partes de los 6500 millones de metros cúbicos por año de agua que se han extraído últimamente del Colorado con destino a California. Ese estado se habrá de conformar con 5400 millones de metros cúbicos por año. Unos 3650 millones de metros cúbicos por año llegan ahora a los campos del valle Imperial. El rectángulo encierra el área mostrada en la fotografía de la página 16. El agua que se recaba del río Colorado contiene alrededor de 800 partes por millón (p.p.m.) de sólidos disueltos ("sales"). Unas tres cuartas partes del agua utilizada para riego se evaporan o transpiran a través de las hojas de las plantas; así pues, el agua drenada de los campos de riego llevará alrededor de 3200 p.p.m. de sales. La mayor parte del agua drenada desemboca en el mar Salton a través de río Nuevo y río Alamo. En los últimos milenios, el Colorado desembocó aproximadamente la mitad del tiempo en el golfo de California y la otra mitad en el mar de Salton, formando el antiguo lago de Cahuilla. Cuando los exploradores europeos vieron por primera vez el Colorado, moría en el golfo de California. Y así lo hizo hasta 1905, en que una avenida lo desvió de nuevo hacia la hoya de Salton (como se conocía entonces). Aquí vertió sus aguas durante dos años, antes de que pudiera redesviársele a su cauce primero. La superficie del mar de Salton se encuentra ahora a 70 metros por debajo del nivel del mar, alcanzando el agua un máximo de 12 metros de profundidad; y constituye la mayor masa de agua de California.



SE SUELEN DRENAR LOS CAMPOS DE RIEGO para mantener el equilibrio de sales en torno a las raíces de las plantas. El agua de riego que se infiltra a través del suelo se enriquece en sales, debido a la evapotranspiración, la combinación de la evaporación directa y la transpiración de las plantas. Para captar este agua salobre, el agricultor instala tuberías, en tendido paralelo, a una profundidad de unos 2 metros y separadas entre sí de 75 a 90 metros. Las tuberías, que están colocadas sin uniones o perforadas, se solían hacer antes de arcilla o de hormigón, pero ahora acostumbran a ser de plástico. Los desagües forman los cauces abiertos, por donde circula el agua subterránea cuando se alcanza un nivel que puede dañar las raíces. El agua salada corre hacia un desagüe, aunque algunas veces se lleva hasta sumideros, de donde se bombea a grandes canales, los llamados colectores de desagües.

concentración natural de las sales en las aguas dulces sea un proceso general y significativo.

Uno de los principales recursos naturales del oeste norteamericano son sus ríos, cuyas aguas pueden represarse en pantanos o en acuíferos subterráneos naturales y liberarlas a discreción. Otro recurso importante es el suelo aluvial de los valles áridos y semiáridos, favorable para la agricultura de regadío, con múltiples climas excelentes para la siembra. Recursos y condiciones climáticas que se han explotado para abastecer el mercado interior y exterior de una diversificada selección de alimentos y fibras, complementarios en una ancha gama de los productos agrícolas de las regiones húmedas.

La agricultura de regadío es costosa. Hay que levantar presas donde embalsar el agua y excavar canales que la lleven allí donde se precisa. Si se encuentra en acuíferos subterráneos, hay que invertir energía en bombearla hasta la superficie. Sólo en California, las empresas públicas y privadas se han gastado miles de millones de dólares en la potenciación de los recursos hídricos, sobre todo en el sector agrícola. El estado está cruzado por miles de kilómetros de canales y tuberías de hormigón que suministran agua a unos 3,6 millones de hectáreas, un quinto del total de la tierra de regadío de la nación. En 1980, el valor de las cosechas de California se cifró en 9200 millones de dólares, lo que representó más del 13 por ciento del valor total de la cosecha norteamericana ese año. California produce un 40 por ciento de los alimentos frescos y hortalizas del país.

La cantidad de agua que debe aplicarse anualmente a la tierra de regadío equivale a una capa de 30 o 150 centímetros de agua en el cultivo, variación que dependerá de la cosecha y el clima. Unas tres cuartas partes del agua aplicada se pierden por evapotranspiración. El resto, que mantiene todas las sales originalmente disueltas (excepto la pequeñísima cantidad que se incorpora en la propia planta), percola hacia abajo y hacia los lados. Así hundida y embebida en el suelo, el agua llegará a un acuífero subterráneo o reaparecerá en otro punto, curso abajo, como una surgencia de un río o un cauce natural, ya sea directamente, ya sea por medio de una zanja de drenaje.

Si, como parece razonable, el promedio anual de agua utilizada en regadío, en el oeste de los Estados Unidos, equivale a una capa de 91 centímetros del área cultivada, a lo largo del año se verterán unos 145.000 millones de metros cúbicos de agua en unos 16 millones de hectáreas de tierra. Aproximadamente 109.000 millones de metros cúbicos del volumen total se pierden por evapotranspiración. Los 36.000 millones de metros cúbicos restantes contienen todas las sales originales (con la salvedad antedicha), a una concentración cuádruple. (El agua de buena calidad puede aprovecharse dos veces al menos, directa o indirectamente, antes de que se torne demasiado salobre para nuevos usos.) A causa del riego intensivo, los estados del oeste –y California en particular–, que gastan más de 37.000 millones de metros cúbicos de agua para sus cosechas, se enfrentan con un grave problema a la hora de aislar y desprenderse del agua salobre.

A la concentración de sales por evapotranspiración se suma otra clase de concentración, que surge del almacenamiento y transporte del agua antes de que la misma llegue al punto de aplicación. La evaporación se produce en las presas, a lo largo de los canales de distribución y en los numerosos embalses reguladores. Si los nuevos pantanos se levantan en áreas montañosas, donde la precipitación es alta y donde la tierra estaba antes cubierta por bosques y praderas, el aumento que registre la evaporación apenas si se notará. Ello obedece a que la evaporación de la preexistente vegetación natural se ha reemplazado, en un grado aproximadamente igual, por la simple evaporación. Pero la mayoría de las albercas se hallan en zonas desérticas o en ambientes de pobre vegetación, otrora cubiertos de un tapiz ralo en que predominaban los matorrales, arbustos o chaparrales. En cuyo caso, la evaporación supera, en mucho, a la primitiva evapotranspi-

ración. Ejemplos característicos de esta situación son la presa de Hoover, en el río Colorado, la de Elephant Butte, en el río Grande, y la presa de la Grand Coulee, en el río Columbia.

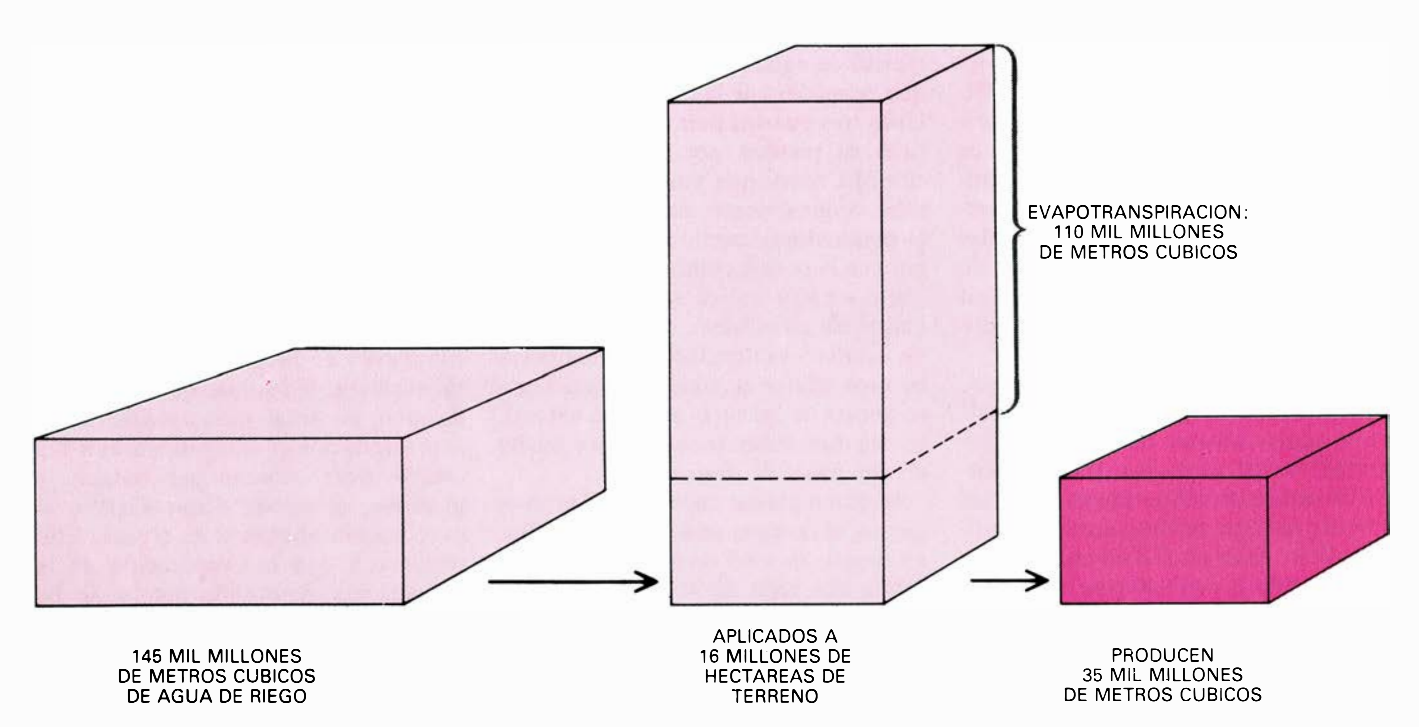
Los grandes ríos del oeste norteamericano nacen en montañas donde suele registrarse una precipitación anual elevada. La concentración de sólidos totales disueltos en las montañas, o en su vecindad, es baja, comúnmente del orden de 50 p.p.m. en la mayoría de los ríos. Muchos ríos del oeste recorren, a través de regiones áridas o semiáridas, grandes distancias, particularmente en sus zonas más bajas; ello supone que la concentración de las sales, por mor de la evaporación, se elevará progresivamente con la distancia aguas abajo. Si se desvía parte del caudal para el riego, la concentración de sales aumentará debido a la evapotranspiración. Cada vez en mayor proporción, se utiliza el agua para refrigeración, como en los sistemas de refrigeración de las centrales térmicas de combustible fósil y nucleares, las cuales también "consumen" agua a través de la evaporación, concentrándose de ese modo las sales.

Hace algunos años me pareció interesante analizar varios sistemas de grandes ríos y estudiar la relación entre la cantidad de sales transportadas por un río en un determinado punto y la cantidad de agua que había entrado en el río aguas arriba de ese punto. A ese objeto, calculé, en toneladas por kilómetro cuadrado, la producción anual de sales de la cuenca por encima del punto dado, y la producción anual, en metros cúbicos por kilómetro cuadrado, de la propia cuenca. Los registros del contenido en sales y el caudal de los principales ríos los lleva a cabo una red de estaciones adscritas al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Tomé 10 años de período sobre el que promediar los registros, por ser ésta la duración de tiempo máxima de registro disponible. Para el estudio seleccioné los ríos siguientes: Missouri, Arkansas, Río Grande, Pecos, Colorado, Gila, Salt, Agua Fría, Sevier, Humboldt, San Joaquín, Mokelumne, American, Columbia y Willamette. Estos 15 ríos transportan el grueso de la precipitación que cae en los 11 estados más occidentales de la Unión.

Cuando se representa a escala logarítmica la producción de sal en función de la producción de agua, la relación demuestra que es notablemente lineal y refuta la creencia común de que los ríos que discurren a través de las regiones más áridas llevan más sales [*véase la ilustración inferior de la página adyacente*]. La verdad es que, a mayor producción de agua por kilómetro cuadrado, producción de sales más elevada. La relación se hace mucho más patente cuando se toman en consideración la gran variación en el tipo y edad de las rocas de las cuencas de los diversos ríos, la relativa brevedad de los 10 años de registro disponible y los efectos de las desviaciones a través de las cuencas, que transportan volúmenes sustanciales de agua con bajo contenido en sales de una cuenca a otra.

El río más caudaloso y rico en sales es el Willamette, en Oregón, que discurre a través de una región de precipitación muy alta. La menor productividad, tanto en sales como en agua, corresponde al Gila, que fluye por una región desierta, pasada la presa de Gillespie, en el sudoeste de Arizona. Todavía en nuestros días se asegura que el Arkansas, Pecos y Colorado son ríos muy salados porque lixivian paulatinamente los antiguos lechos de sal enterrados. Pero las pruebas de que disponemos no corroboran ese juicio. La salinidad de los ríos es, simplemente, un problema de la cantidad relativa de agua que se transforma en vapor por acción natural o por intervención del hombre.

La clave para el mantenimiento de un balance o equilibrio salino en los campos de riego está en un drenaje adecuado. Sea natural o artificial, el drenaje remite al traslado del agua desde un sitio donde no interesa a otro, mediante un conducto o canal que puede correr por, sobre o bajo el suelo. La expresión drenaje agrícola alude espe-



EN EL RIEGO DE LOS CAMPOS se invierte la fracción mayor de agua de los Estados Unidos. Se computa por consumida el agua utilizada para las cosechas porque tres cuartas partes se disipan a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Se estima que alrededor de 145.000 millones de metros cúbicos de agua por año se aplican a unos 16 millones de hectáreas de tierra en los estados del oeste, esto es, alrededor de 200 milímetros de agua por cada metro cuadrado regado en el período de cultivo. Admitiendo que tres cuartas partes del agua, unos 110.000 millones de metros cúbicos, se pierdan por evapotranspiración, las sales presentes en el volumen original, representadas en la ilustración por el sombreado en color, se concentran en los 35.000 millones de metros cúbicos restantes de agua. Este agua contiene frecuentemente más de 2000 p.p.m. de sales, que deben eliminarse de los campos de cultivo.

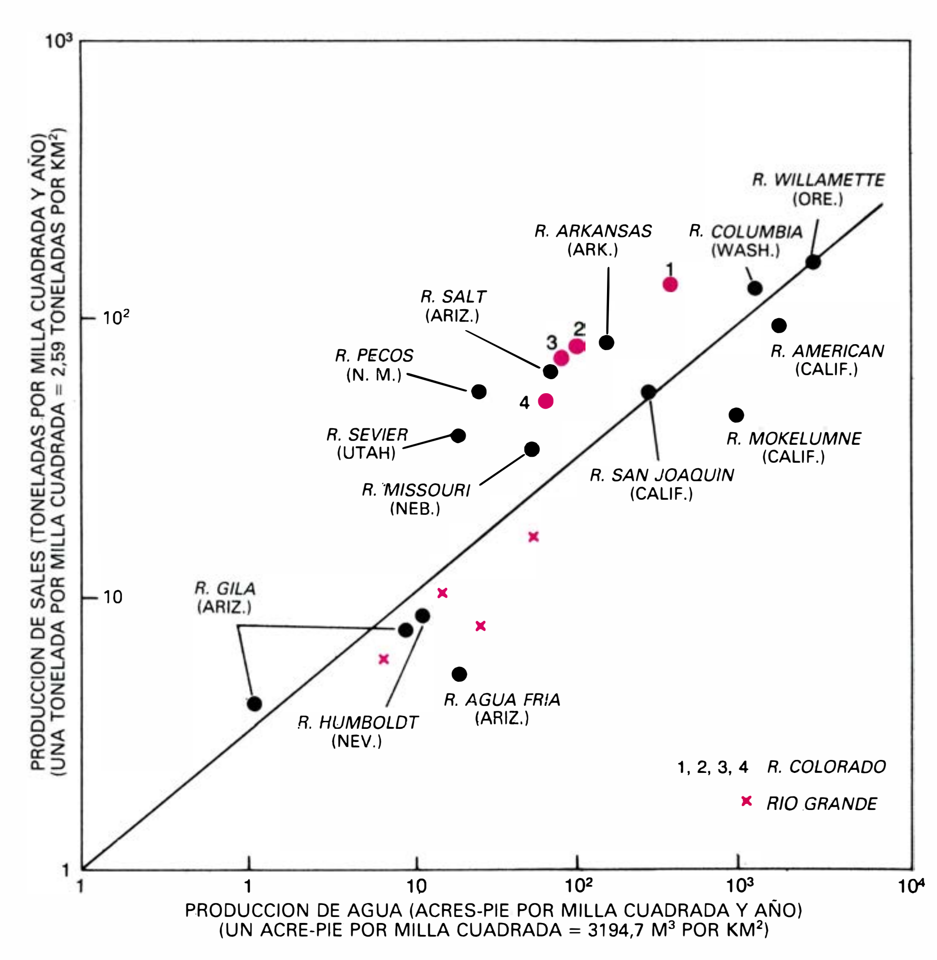
cíficamente a las medidas encaminadas a hacer más honda una capa freática que está demasiado cerca de la superficie para permitir el crecimiento óptimo de las cosechas. En las regiones húmedas, se rebaja la capa freática a fin de crear un suelo aireado en torno a las raíces de las plantas e incrementar su consistencia para las faenas de labranza y otras labores agrícolas. Esa es la razón de que observemos, en esas regiones, redes de acequias o zanjas de desagüe de hormigón, a una profundidad de 30 o 150 centímetros bajo la superficie.

En regiones áridas, el drenaje ha de cumplir, además, otra misión: mantener un balance de sales satisfactorio en la proximidad de las raíces de las plantas. En zonas de alta pluviosidad o donde se practica el riego, el agua y las sales percolan hacia abajo. En tiempo seco y entre riego y riego, el agua y las sales ascienden por acción capilar. En un área húmeda, la cantidad de sales que entran en el suelo es baja en un comienzo; no habrá mucho que subir, pues, por acción capilar durante la estación seca. Además, los períodos secos no suelen dilatarse. En los climas áridos, las acequias de drenaje o las zanjas de desagüe deben ser más profundas que en las regiones húmedas, a fin de impedir el movimiento de las sales hacia arriba. Se les considera eficaces cuando los canales de drenaje se han construido a 180 centímetros, por lo menos, bajo el nivel del suelo. El efluente de la red de drenaje debe descargarse de tal forma que la sal arrastrada por el agua de riego se vierta sin lesionar los intereses de los usuarios del agua, curso abajo.

En el sur de California, junto al Valle Imperial, que constituye la extensión de tierra de labor de regadío mayor del hemisferio oeste, existe un lugar notable y fortuito para absorber el agua salobre drenada. Más de 200.000 hectáreas se cultivan en el valle. Para regar tan vasta extensión, se trae agua desde 130 kilómetros de distancia, desde el río Colorado, a través del canal All-American. Este canal abastece también al canal Coachella, que lleva agua del río Colorado otros 196 kilómetros hasta una rica zona agrícola de unas 25.000 hectáreas. (El Colorado aporta poco más de la mitad del agua consumida en el sur de California, incluido el suministro municipal de las dos mayores ciudades del estado: Los Angeles y San Diego.) El agua salobre drenada del riego de los campos del Valle Imperial y de Coachella se canaliza hacia el mar de Salton, cuya salini-

RIO Y LOCALIZACION	SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (PARTES POR MILLON)	CONDUCCION ELECTRICA (MILIMHOS POR CENTIMETRO)	RAZON DE ABSORCION DE SODIO
COLUMBIA, EN WENATCHEE, WASH.	78	0,15	0,2
SACRAMENTO, EN TISDALE, CALIF.	180	0,16	0,6
MISSOURI, EN WILLISTON, N.D.	574	0,84	2,0
COLORADO, EN YUMA, ARIZ.	740	1,06	2,2
RIO GRANDE, EN EL PASO, TEX.	754	1,16	3,6
ARKANSAS, EN LA JUNTA, COLO.	981	1,21	1,5

LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE RIEGO en el oeste de los Estados Unidos varía considerablemente. Su amplia diversidad queda reflejada en estos ejemplos tomados de seis ríos. Al Columbia, en el extremo noroccidental, que se extiende a lo largo de casi 2000 kilómetros y muestra una descarga total de 556.000 millones de metros cúbicos por año, sólo lo supera en caudal total el Mississippi. El Arkansas, aún más largo que el Columbia (2330 kilómetros), descarga, como mucho, sólo un sexto del agua del anterior y ocupa el treceavo puesto entre los ríos de los Estados Unidos. Las descargas de los otros cuatro cursos fluviales quedan muy atrás. La expresión "sólidos totales disueltos" se sigue empleando bastante para medir la salinidad, que suele expresarse en "partes por millón" (p.p.m.); para los agricultores, las otras características de la tabla resultan, empero, más significativas. La conductividad eléctrica tiene una mayor influencia en el crecimiento de las plantas que la salinidad. Son preferibles los valores bajos. La razón de absorción de sodio se calcula a partir de los iones sodio, calcio y magnesio, expresados en miliequivalentes por litro de cada ión. La razón expresa el exceso de sodio, o la deficiencia de calcio, que afecta a la permeabilidad del agua en el suelo. Los valores por debajo de 10 son satisfactorios.



LIXIVIACION DE LAS SALES DEL SUELO; es función directa de la precipitación: cuanto mayor es la escorrentía por unidad de área de la cuenca, mayor es la cantidad de sal que transporta el río que drena la cuenca. Para cuantificar la relación, el autor analizó registros del Servicio Geológico de los Estados Unidos, referidos a un período de diez años, sobre el contenido de sales y el caudal del río en los puntos de muestreo seleccionados, en quince cursos del oeste de los Estados Unidos. El contenido en sales y el caudal se relacionaron con la superficie de la cuenca situada por encima de los puntos de muestreo, a fin de calcular los valores de la producción de sal en toneladas y producción de agua en acres-pie por milla cuadrada y año. Una representación logarítmica de los dos valores se aproxima claramente a una línea recta. El río Willamette, que drena la cuenca que goza de la más alta precipitación por unidad de superficie de los considerados, también produce más sales por milla cuadrada de cuenca. El río menos productivo, tanto en agua como en sales, es el Gila, que atraviesa la región extremadamente árida de Arizona.

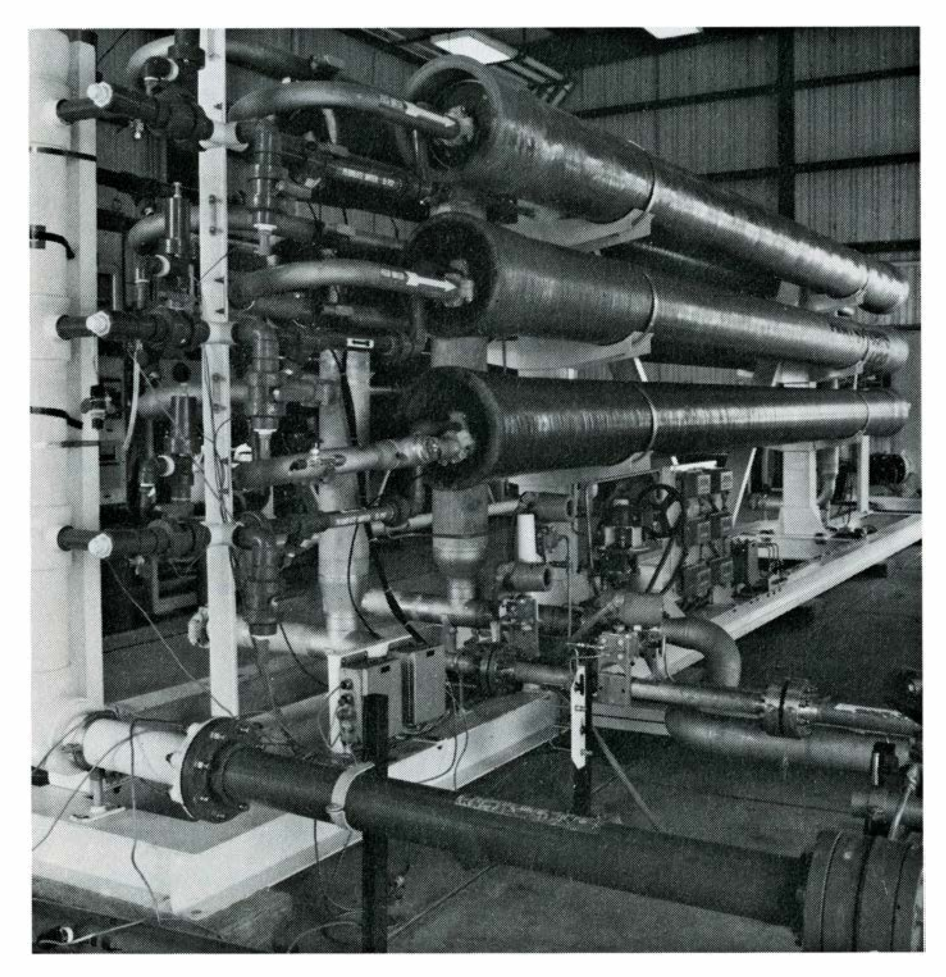
dad supera ligeramente la del océano. Un 90 por ciento del caudal que desemboca en el mar de Salton es agua residual de los distritos del Valle Imperial, Coachella y Mexicali.

Desde 1955, los campos de regadío del Valle Imperial han sido exportadores netos de sales, desagüando alrededor de un 15 por ciento más de sales de las que transporta el canal All-American hasta la región desde el Colorado. El agua vertida al mar de Salton contiene alrededor de 3500 p.p.m. de sales y sirve para retardar la tasa de incremento del nivel de salinidad total de dicho mar. El Salton, que se encuentra a 70 metros por debajo del nivel del mar, era una depresión seca e incrustada de sales hasta 1905, cuando una crecida del Colorado rompió los diques naturales. El agua del Colorado se estuvo vertiendo en la depresión a lo largo de dos años, hasta que se le volvió a encauzar a su antiguo lecho. Con un área de 958 kilómetros cuadrados, el mar de Salton es el mayor lago de California y una importante zona de recreo.

Donde no existe un mar de Salton o algo parecido que reciba el agua drenada de los campos de riego, el problema relativo al equilibrio salino se hace más espinoso. El vulgo piensa que el agua de un río, además de ser dulce, debe seguir siéndolo aguas abajo, hasta su desembocadura o su entrada en un estuario. En las regiones húmedas del mundo, la realidad raramente se aparta de ese desideratum; no así en las regiones más áridas, donde los ríos se hayan explotados para fines agrícolas. Antes de que el hombre empezara a regular los cauces, las avenidas estacionales cumplían bien la misión de arrastre de sales hasta el océano y la de mantenimiento del equilibrio de sales en la cuenca fluvial. Hoy, con el caudal regulado por sistemas de represa y con un alto consumo del agua que liberan, no queda ya flujo residual que permita obtener un buen balance. Y así, de un modo u otro, las sales se retienen en las cuencas de los ríos.

No sólo sedimentan las sales en algún lugar del sistema, sino que, por si fuera poco, se toman medidas que impiden, deliberadamente, su arrastre hasta el mar. La legislación norteamericana sobre la tierra recoge las demandas de los ecologistas y las de los usuarios del agua, que defienden el mantenimiento de los ríos, si no "wild and scenic" (silvestres y pictóricos), por siempre, sí al menos con agua dulce a lo largo de todo su curso. La reglamentación y aplicación de medidas para llevar a la práctica esa ley resultan peligrosas para el futuro. El hilo conductor de esos proyectos es el desvío de los flujos salinos desde donde se encuentran hasta las charcas de evaporación. Allí se evaporará el agua de la superficie dejando detrás, capa sobre capa, las sales cristalinas. Se pretende que las charcas de evaporación se localicen allí, bien donde el suelo subyacente sea ya salino o bien donde el suelo sea relativamente poco poroso. Cuando no se dé ninguna de esas condiciones, se forrarían las charcas con un material impermeable. Estos proyectos, diseñados para retener las sales en la propia cuenca fluvial, pueden mostrarse eficaces para unos pocos años o décadas a lo más, pero resultarán desastrosos a largo plazo.

¿Por qué? Los proyectos fracasarán por varios motivos. Aunque nada haya contra el hecho de que las aguas subterráneas que se encuentran debajo de las charcas de evaporación sean salobres o salinas, las cuencas subterráneas dotadas de gradiente de flujo habrán de desagüar en algún punto próximo a su extremo más bajo. El agua salina de la cuenca de evaporación ayudará a incrementar la "diferencia de nivel", o presión hidráulica, sobre las aguas salinas subyacentes y, por tanto, aumentará la tasa de descarga en la salida natural, causando daños en las aguas subterráneas y en las tierras, curso abajo. Si la charca de evaporación se construye en un suelo impermeable al agua dulce, hallaremos que el terreno en cuestión se irá haciendo más permeable con la salinidad del agua. Este hecho se ha



ESTACION DESALINIZADORA: una de las dos instalaciones de Yuma (Arizona) recientemente construidas en los Estados Unidos por la Water and Power Resources Service. Supone el primer paso de un programa para tratar aguas salobres procedentes del Wellton-Mohawk Irrigation and Drainage District, que son demasiado salobres para verterlas al río Colorado. En la actualidad, el agua salobre se envía, mediante una derivación de desagüe de 81 kilómetros, al golfo de California. Esta estación de ensayo de prueba, construida por la Fluid Systems Division de la UOP, está proyectada para recabar unos 1.280.000 litros por día de agua de baja salinidad (250 p.p.m. de sólidos) de una corriente de alimentación de agua salobre de 1.780.000 litros por día, con salinidades de alrededor de 2800 p.p.m. La desalinización se efectúa mediante un proceso de ósmosis inversa. Se le obliga al agua salina a pasar a través de una membrana a una presión de 21 a 28 kilogramos por centímetro cuadrado. Al atravesar las membranas, la sal queda retenida. La planta definitiva, que empleará dos procesos diferentes aunque similares, tendrá una capacidad estimada en 272 millones de litros de agua desalinizada por día. Este caudal se mezclará con agua de drenaje, no tratada, para producir 113,5 millones de metros cúbicos de agua por año (con una calidad superior a la acordada) que podrán agregarse a las aguas que el Colorado lleva a México. Se procesará un volumen de agua equivalente para aprovecharla en regadíos estadounidenses, aguas arriba.

comprobado reiteradamente. Son muchos los tipos de materiales que se han propuesto para impermeabilizar las charcas de evaporación: encofrado de caucho y de plástico, mezclas asfálticas y tipos especiales de hormigón. Es probable que algunos encofrados tengan una vida eficaz de hasta unos 50 años, pero cabe esperar que no duren más. Sin duda, su vida será mucho más breve, cuando estén expuestos al agua salina, de lo que lo es al exponerlos al agua dulce, que suele ser su destino normal.

Otro de los principales empeños, puestos hoy en el mantenimiento de las aguas dulces en las zonas bajas del sistema de dársenas del río, es la construcción de "canales salinos". Se trata de canales o tuberías impermeabilizados a través de los cuales llegan al océano o a algún sumidero las aguas salobres. Los conductos deben estar a un nivel superior al de los ríos o sistemas adyacentes destinados a la distribución del agua de riego, al objeto de asegurar que el agua salada de los sumideros no vuelva a contaminar el agua limpia. Ello significa que el efluente del sistema de drenaje, junto con la posible agua salina o salobre de las fuentes, habrán de bombearse hasta los canales salinos, lo que importará un considerable costo de energía. Aun cuando se aceptara el coste energético, los canales de agua salina no podrán, por sí solos, establecer un equilibrio salino, ya que quedará todavía un flujo de aguas subterráneas bajo las líneas de drenaje o encima de los acuíferos salinos, que podría bombearse.

El Servicio de Recursos y Energía Hidráulica de los Estados Unidos (antigua Oficina de Recuperación) ha terminado recientemente un canal abierto, salino, de 132 kilómetros, que corre más o menos paralelo al río San Joaquín, en California. Está proyectado para drenar 12.000 hectáreas de campos de primera clase en el valle de San Joaquín. Se trata, a buen seguro, del canal salino más largo construido hasta el momento; desagua en el embalse de Kesterson, al sur de Modesto. Desde allí, las aguas salinas se filtran gradualmente en el río San Joaquín, a medida que éste se va aproximando al "Delta", en el estuario del cabo de la bahía de San Francisco, formado por la confluencia de los ríos San Joaquín y Sacramento. El ramal que llevará el caudal salino directamente al "Delta" no se ha construido aún. El canal ya existente es el primer trozo del "Gran Canal", de una longitud proyectada de 467 kilómetros, que se financiará con fondos federales y del estado. El costo estimado supera los 1200 millones de dólares. Para el año 2005, este canal abastecerá 200.000 hectáreas y tendrá una capacidad de arrastre anual de tres millones de toneladas de sales.

La dificultad de alcanzar el balance salino en las cuencas fluviales con elevado consumo de agua se apreciará mejor si atendemos al contexto general de la historia hidrológica del complejo de la cuenca. Las tierras del valle y de la cuenca son suelos que han sido depositados primordialmente por las inundaciones. El canal del río que rodea el valle y la cuenca tiene hoy un engañoso aspecto de perpetuidad. En el curso de una fuerte inundación, los sedimentos se esparcieron a lo largo de la parte más profunda del canal y el río se desbordó. A medida que el agua se expande, se produce una notable disminución de su velocidad y de la profundidad de su cauce. De la sedimentación de arena y otras pequeñas partículas han surgido diques naturales. Las partículas de tierra más finas sedimentan a una distancia considerable del canal central y a un ritmo mucho menor. El suelo de sedimentación de valle posee, pues, una textura media, abundando las margas.

Donde la velocidad de la corriente se reduce hasta casi ser nula, en las zonas situadas en las partes más bajas del río, donde el cauce aumenta de anchura, se sedimentan barros de textura fina. El propio canal tiende gradualmente a elevarse sobre las tierras que lo rodean, fenómeno al que no son ajenos los diques naturales. Más tarde, cuando ocurran inundaciones excepcionales, el río se desbordará de nuevo creando un nuevo canal de mayor inclinación. El nuevo canal englobará al viejo a medida que la corriente lo vaya erosionando. Con el tiempo, inundación tras inundación, los sedimentos crecerán, taponando la red de canales enterrados. Tanto las aguas superficiales como las subterráneas tenderán a seguir estos canales entrelazados; las aguas más profundas aparecerán en lo que ha dado en llamarse dedos acuíferos. Particularmente en las riberas, las aguas subterráneas poco profundas se filtrarán normalmente en el canal del río. Esa corriente difusa es más profunda que las zanjas y tuberías construidas para el drenaje agrícola.

Por norma, las tuberías de drenaje muestran una eficacia mayor en las cuencas, tierras ribereñas y en ciertos suelos estratificados, donde el agua freática "semiestancada" asciende hasta 180 o 210 centímetros de la superficie. Se dice que el agua freática está semiestancada cuando la capa variable de las arenas depositadas por el río tiende a aislar el agua próxima a la superficie del grueso de la capa de agua subterránea, que se encuentra a niveles más profundos. En estas condiciones, es poco probable que el agua de riego, enriquecida en sales, se infiltre y degrade el agua subterránea más profunda, que podrá utilizarse para el riego u otros usos. Río arriba, en las tierras del valle, la estructura subterránea es tal que el agua próxima a la superficie no puede aislarse de la profunda; por cuya razón, las zanjas de desagüe allí construidas resultan ineficaces en lo concerniente al mantenimiento de la calidad del agua subterránea.

Antes de conocerse el riego intensivo, las aguas subterráneas de los valles del oeste y sus cuencas gozaban de un alto nivel de calidad en casi todos los puntos. Los acuíferos subterráneos recibían una carga abundante en las partes altas de los valles, en el nacimiento de los ríos. Las aguas subterráneas descargaban luego en la cuenca del valle y, en su mayor parte, en los propios ríos, en forma de corriente difusa. Cuando los agricultores comenzaron a bombear agua de los acuíferos para regar, se produjo un descenso del nivel de la capa freática, rebajándose el flujo de descarga en los ríos. Con el tiempo, la capa freática bajó tanto que ya no descargaba nada. Los acuíferos se transformaron así en depósitos cerrados. Al no poder evacuarse, las sales se fueron acumulando.

Son muchísimas las zonas donde el bombeo del agua desde los acuíferos subterráneos abastece las necesidades del riego y la población urbana. Los restos urbanos recolectados como aguas residuales suelen arrastrar un aumento total en sólidos disueltos de 300 a 350 p.p.m. Donde tales residuos no se descargan directamente en el océano, todas las sales que llegan a la cuenca quedan atrapadas y sedimentan en ella.

Cuando los acuíferos que se aprovechan para usos agrícolas y urbanos se localizan cerca de la costa, la capa freática a bombear se halla por debajo del nivel del mar, con la consecuente intrusión de agua de mar en el lecho subterráneo. Para frenar la intrusión de agua marina suelen perforarse una serie de pozos de inyección paralelos a la costa. El agua bombeada de dichos pozos puede ser algo salina y en algunos casos se han detectado trazas de agua residual. Cabe reconocer como un éxito de la técnica la creación de "montículos" de agua que repelen el agua marina.

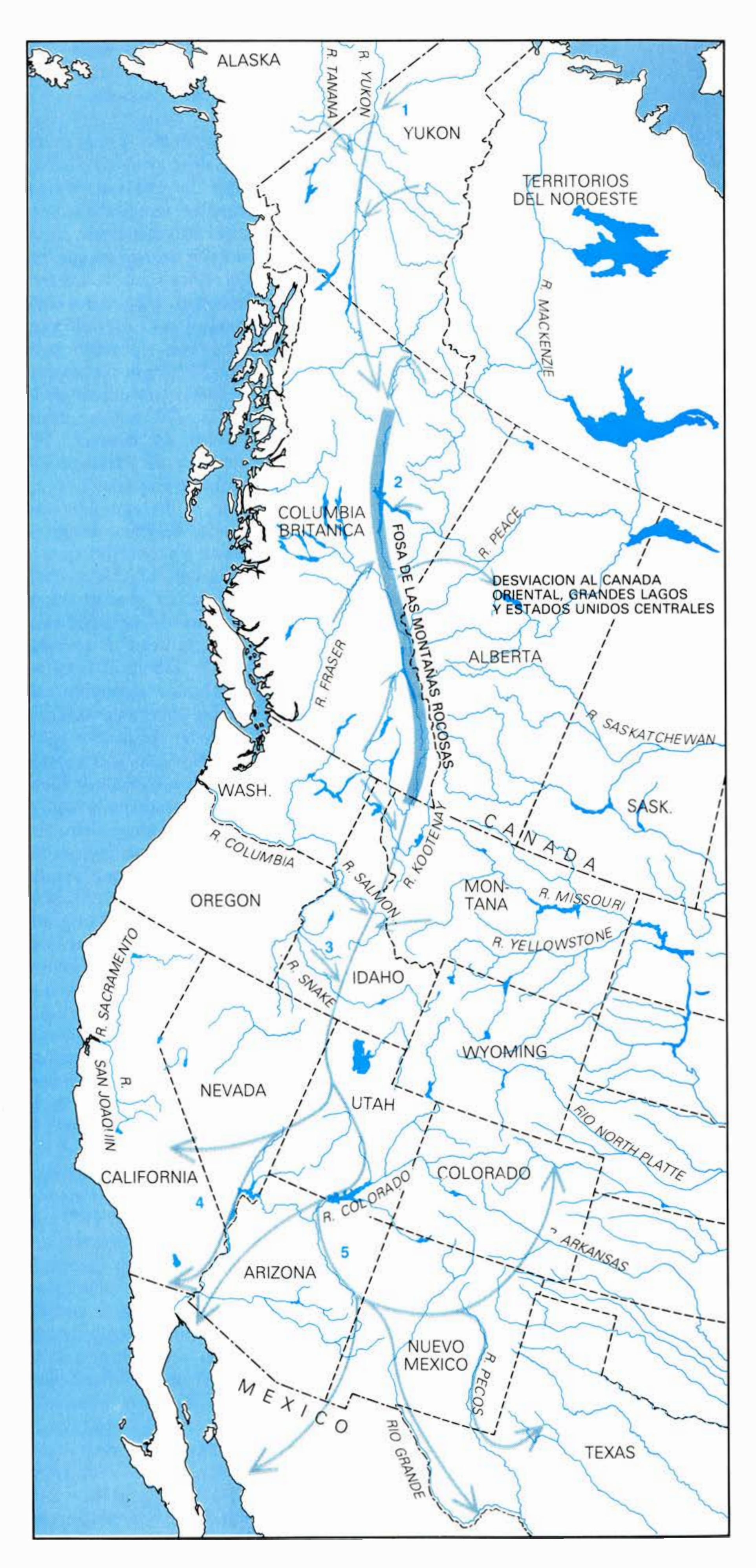


LA CUENCA DEL RIO COLORADO drena una superficie de 619.000 kilómetros cuadrados, que se extiende por siete estados. Nueve grandes embalses dan una capacidad total de almacenamiento de alrededor de 79.500 millones de metros cúbicos, aproximadamente 4,5 veces el caudal anual de 17.000 millones de metros cúbicos medidos en Lee Ferry. El mayor embalse, con una capacidad de 31.800 millones de metros cúbicos, es el lago Mead, alimentado por la presa de Hoover. De acuerdo con el Colorado River Compact, de 1922, los cuatro estados de la parte alta de la cuenca, más arriba de Lee Ferry, se adjudicaron 7950 millones de metros cúbicos anuales y los tres estados situados en la parte baja del embalse (Arizona, Nevada y California) se asignaron 9175 millones de metros cúbicos. Cuando se lleve a término el Central Arizona Project, que transportará, en 1985, 1470 millones de metros cúbicos por año, California dispondrá sólo de 5400 millones de metros cúbicos, dejando 1835 millones para México. En la sequía de 1977, California extrajo del río Colorado 6850 millones de metros cúbicos de agua. Los cuatro puntos de muestreo, seleccionados por el autor en su estudio de producción de sal y agua en la cuenca del Colorado, que se muestran en la parte baja de la ilustración de la página 21, son Glenwood Springs (*1*), Lee Ferry (*2*), Grand Canyon (*3*) y un punto por debajo de la presa de Hoover (*4*). Las cuencas correspondientes a esas áreas se identifican por la línea a trazos en color. Mientras que la cuenca de Glenwood Springs aporta 168.600 metros cúbicos de agua y 53 toneladas de sal por kilómetro cuadrado y año, la cuenca de la presa de Hoover aporta sólo 28.700 metros cúbicos de agua y 19,5 toneladas de sal por kilómetro cuadrado y año. (La cartografía del artículo es de A. Tomko.)

Aunque puede objetárseles que bloquean totalmente el transporte de las sales al mar, hasta donde las arrastrarían las aguas subterráneas. Ni que decir tiene que podrán tomarse medidas correctivas.

El único procedimiento eficaz para mantener dulces las aguas subterráneas de una cuenca consiste en bombear agua de las fuentes, próximas a los extremos inferiores de las cuencas, donde la salinidad es más alta, y acelerar la expulsión del efluente hacia el océano u otro sumidero. Será imperioso, al propio tiempo, aumentar la recarga en la parte superior de las cuencas. (De no tomarse esas medidas, habría que ir pensando en el día en que el acuífero quede inservible debido a su salinidad.)

La tradición seguida en los Estados Unidos en lo relativo al desarrollo de los recursos hidráulicos ha sido esperar que el propio río abastezca de agua dulce a los puntos de almacenamiento dispuestos cerca de la desembocadura. Esta solución, la más barata en términos generales, tiene la ventaja de captar las avenidas y crecidas, cosa que los embalses levantados en las zonas altas del recorrido del río no podrían hacer. Esta solución ignora el principio básico, esencial a largo plazo, de ir aguas arriba para realizar el abastecimiento y permitir que los tramos inferiores de los ríos se carguen de sal. Permítaseme dar tres ejemplos ilustrativos: el siste-



PROYECTO para desviar agua desde las abundantes fuentes de Alaska y Canadá hasta las regiones que tienen poca, que presentó la Ralph M. Parsons Company, de Pasadena, California, en 1964. Aparece sólo la sección occidental del proyecto conocido por North American Water and Power Alliance (NAWAPA). La extensión oriental del plan desviaría aguas desde la Columbia Británica hasta el río Mississippi, los Grandes Lagos y este de Canadá. Se estima que la inversión necesaria para sufragar los costes superaría los 200.000 millones de dólares; las obras durarían unos 30 años. El NAWAPA transportaría alrededor de 196.000 millones de metros cúbicos de agua por año para uso industrial, municipal y agrícola. Aproximadamente la mitad se destinaría a los Estados Unidos y el resto a Canadá o México. Una red de centrales hidroeléctricas generarían toda la energía precisa para bombear el agua y suministrarían un excedente de 70.000 megawatt, por lo menos. La recogida de las aguas, que comenzaría en la cabecera de los ríos Yukon y Tanana en Alaska (*1*), podría completarse con una serie de corrientes que se extienden hasta el río Peace (*2*). Las aguas encauzadas se llevarían a un embalse descomunal de 800 kilómetros, el Rocky Mountain Trench, formado mediante la construcción de presas en las cabeceras de los ríos Columbia, Fraser y Kootenay. El sistema recibiría agua también del Clark, Snake y otros ríos del noroeste de los Estados Unidos (*3*). El agua para riego y otros servicios se enviaría a los estados del suroeste y al noroeste de México (*4*). Un ramal abastecería los estados de Nuevo México, Texas, Colorado, Kansas, Nebraska, Oklahoma y otras partes de México (*5*).

ma del río Grande, el sistema del Colorado y el del este del Delta de la bahía de San Francisco.

Río Grande nace en el suroeste de Colorado y desemboca en el golfo de México; tiene una longitud de casi 3000 kilómetros. Es el tercer río más largo de los Estados Unidos; aunque, como el Colorado, no está cualificado para incluirlo en la lista del Servicio Geológico de los 33 cursos fluviales con la descarga mayor. Sus últimos 1280 kilómetros de recorrido conforman la principal frontera entre los Estados Unidos y México; la distribución de su caudal ha sido, largo tiempo, materia de contencioso entre los dos países. A grandes rasgos, el flujo total de la parte más alta de su curso, salvo en caso de inundación, se acumula y utiliza aguas arriba desde El Paso hasta el confín occidental de la frontera mexicano-estadounidense. Apenas hay residuos que puedan aproximar siquiera sus aguas al equilibrio salino. Al sur de Nuevo México y al oeste de Texas se van presentando graves problemas salinos. A lo largo del curso inferior, entre El Paso y la desembocadura en el golfo de México, hay tres grandes presas internacionales: Amestad, para almacenamiento; Falcon, para almacenamiento y producción de energía hidroeléctrica y Anzalduas, para derivación, con fines agrícolas sobre todo. (En México se denomina Río Bravo del Norte a la parte más baja del río, desde El Paso hasta el golfo; la mayor parte del agua que allí se vierte baja de montañas mexicanas.) El actual plan de desarrollo elimina cualquier posibilidad de llegar a un equilibrio salino, ni antes ni después de El Paso.

El Colorado, con un recorrido de 2320 kilómetros, es, de entre los ríos norteamericanos, el principal abastecedor de agua para consumo. En su curso, la presa de Hoover creó el lago Mead, un depósito de almacenamiento y zona de recreo de unos 640 kilómetros cuadrados. Alimenta una central hidroeléctrica que genera 1345 megawatt; más abajo encontramos siete pantanos más, dos de los cuales producen también energía eléctrica. El último embalse es el de Morelos, levantado para represar agua para regar el valle de Mexicali, en México. Las regiones de regadío próximas al río devuelven el agua de drenaje, enriquecida ahora cuatro veces en su contenido salino. Alrededor del 70 por ciento del caudal total, curso abajo de la presa de Hoover, que contiene 700 p.p.m. de sales, llega a California, a través del acueducto del río Colorado, que abastece Los Angeles y San Diego, y el canal All-American, que abastece el valle Imperial y los campos de Coachella.

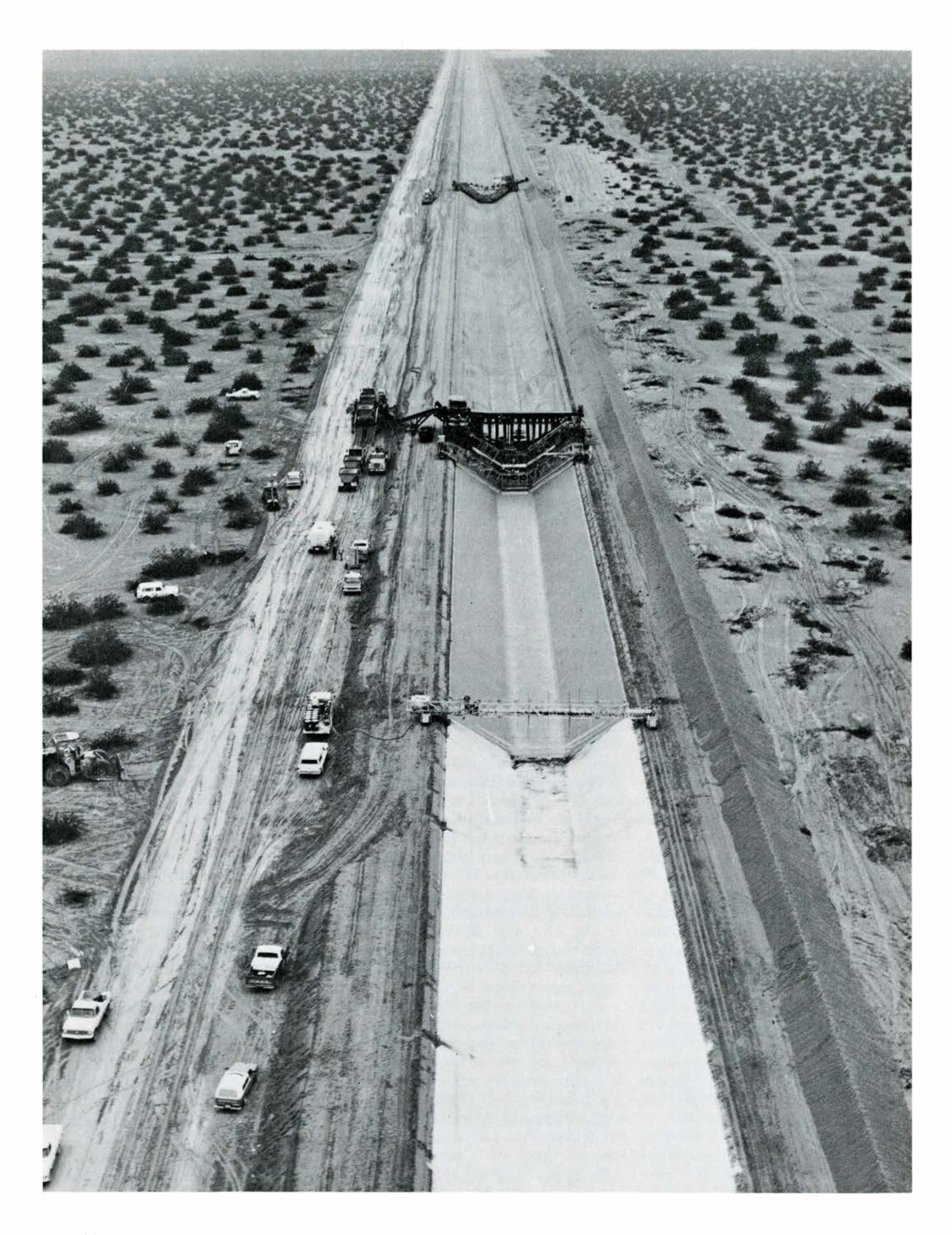
Debido principalmente a la gran extracción de agua (y de sal), las regiones más bajas del Colorado disfrutan de un razonable equilibrio salino. El problema es el alto contenido en sales del curso inferior del río: más de 800 p.p.m. En 1974, por orden de la Environmental Protection Agency, los siete estados que baña el río Colorado prepararon un programa conjunto para mantener la salinidad, en la cuenca más baja, al mismo nivel o por debajo de lo medido en 1972: 723 p.p.m. curso abajo de la presa de Hoover, 747 p.p.m. en el embalse de Parker y 879 p.p.m. en el embalse Imperial.

El mismo año, y en cumplimiento parcial del Tratado Mexicano de aguas, los Estados Unidos acordaron que la salinidad de las aguas del río Colorado vertidas en México por el embalse de Morelos no rebasaría la salinidad promedio del agua que llega al embalse Imperial en más de 115 (± 30) p.p.m. El tratado con México dictamina que los Estados Unidos deberán entregar a México 1677 millones de metros cúbicos de agua del río Colorado y otros 173 millones de metros cúbicos de fuentes adyacentes al Colorado en la frontera mexicano-estadounidense, esto es, un total de 1850 millones de metros cúbicos. Con objeto de asegurar el caudal del río requerido para mantener la salinidad acordada, el Servicio Hidrográfico e Hidroeléctrico de los Estados Unidos ha acordado construir una planta de desalinización en Yuma (Arizona), que procesará un gran volumen de agua salina de drenaje del Wellton-Mohawk Irrigation and Drainage District, de Arizona. Antes, el agua salobre se vertía al río Colorado, curso abajo de la presa de Morelos; hoy se lleva hasta el golfo de California, a través de un ramal de drenaje de 81 kilómetros de longitud, la mayoría de éstos en territorio mexicano, que se terminó en 1977 con un coste de 27 millones de dólares, desembolsados por los Estados Unidos.

La planta desalinizadora, cuando esté terminada a mediados de la década de 1980, con un costo estimado de 216 millones de dólares, será la mayor de su categoría. Recibirá unos 132 millones de metros cúbicos al año, con una salinidad media de 2800 p.p.m.; y liberará, por un lado, 90 millones de metros cúbicos (266 millones de litros al día) con una salinidad de sólo 225 p.p.m. y, por otro, 42 millones de metros cúbicos con una salinidad de 8200 p.p.m. La corriente salobre irá a parar al golfo de California. Si el agua de baja salinidad se necesita para satisfacer las cláusulas del tratado, se podrá devolver la corriente, sin diluir, al Colorado en Yuma. Pero lo normal será que la corriente desalinizada se mezcle con agua de drenaje, no tratada, resultando más de 113 millones de metros cúbicos de agua con una salinidad inferior a las 800 p.p.m. Este agua de buena calidad costará cerca de 20 centavos de dólar por metro cúbico: más de 30 veces el importe del agua de riego del valle Imperial. De la desalinización se encargarán membranas de plástico que eliminan las sales por un tratamiento de ósmosis inversa.

Para asegurar el caudal que irá a México y reducir el volumen de agua dirigido a California, se acaban de reconstruir y forrar de hormigón 78 kilómetros del canal Coachella, con un importe total de 45 millones de dólares en un esfuerzo por ahorrar 163 millones de metros cúbicos de agua al año, que antes se perdía por filtración en el desierto circundante. Se espera que la cantidad total extraída del río Colorado, vía canal All-American, pueda reducirse de 614 a 451 millones de metros cúbicos por año. El recubrimiento de dicho conducto ayudará también a la pervivencia de California con la asignación definitiva de 5427 millones de metros cúbicos de agua del Colorado. (Recientemente se han llevado 6537 millones de metros cúbicos por año y en la sequía de 1977 se recabaron 6907 millones de metros cúbicos.) Aunque estas costosas medidas permitirán que los Estados Unidos cumplan sus obligaciones contratadas con México, queda patente que el Colorado no puede aportar más agua para la expansión de la agricultura.

El Delta es una zona de estuario que se extiende en una superficie de unos 3000 kilómetros cuadrados. Formado por la confluencia de los ríos Sacramento, San Joaquín y otros menores, cerca del centro de la rica región agrícola del valle Central, era una zona pantanosa cubierta de espadaña, situada a nivel del mar o poco más. A partir de la aprobación del California Swamp and Overflow Act, de 1850, de una manera tímida y, con gradual decisión tras la gran inundación de 1861-62, la tierra comenzó a recuperarse con un sistema de diques construidos alrededor de las múltiples islitas bordeadas por ríos y ciénagas. Cuando, a finales de siglo, pudieron emplearse bombas mejores, el proceso cobró un impulso extraordi-



PARA CONSERVAR EL AGUA que se perdía por filtración, se acaban de reconstruir y guarnecer con hormigón 78 de los 197 kilómetros de que consta el canal Coachella. Se espera que la nueva sección, parte de la cual se muestra aquí, ahorre 161,5 millones de metros cúbicos de agua por año, reduciendo la cantidad extraída del Colorado, vía canal All-American, de 609 a 448 millones de metros cúbicos. Foto cedida por Water and Power Resources Service.

nario. Esta recuperación continuó hasta entrada la década de 1920. El material para los diques procedía del dragado de los ríos y cenagales. Como con los polders holandeses, la recuperación requiere el bombeo continuo hacia canales adyacentes del agua de drenaje y de la de lluvia. El agua de riego se obtiene sifonando agua sobre los diques. Hay unas 225.000 hectáreas de superficie cultivable en el complejo del Delta; el laberinto formado por los canales de agua se explota intensamente como zona de recreo.

La tierra era originalmente turba, a menudo hasta profundidades de más de 10 metros. Como ocurre siempre que se drena suelo de turba, se ha registrado un hundimiento general del nivel de la arena, cifrado en unos 7,5 centímetros anuales. Algunas tierras están ahora a 6 metros por debajo del nivel medio del mar. No es pues de extrañar que los diques hayan cedido en más de una ocasión. En los últimos dos años, cuatro grandes islas se inundaron al romperse sus diques. Organismos federales y estatales trabajan, con fondos públicos, para reparar y reforzar los diques en cuestión. Por lo que cabe preguntarse si este gasto está justificado, habida cuenta de que el hundimiento constituye un evidente problema a largo plazo.

Un enfoque alternativo para solucionar el problema del Delta, que se propuso hace algunos años, postulaba dotar a las tierras agrícolas estables del Delta de un abastecimiento de agua dulce procedente del proyectado canal Peripheral. Este canal serviría también para acarrear agua del río Feather, norte del Delta y alrededores del extremo este del Delta hasta el valle de San Joaquín, en el sur. Aunque la legislación de California autorizó la construcción del canal Peripheral el año pasado, el proyecto ha encontrado fuerte oposición por parte de los ecologistas y otros grupos, que piden que el tema se someta a un referéndum estatal. Además de la construcción del canal Peripheral, cuyo costo estimado alcanzaría de 700 a 1300 millones de dólares, la legislación autoriza la inversión de 4100 millones para la construcción, en los próximos 25 años, de presas y otras obras que promuevan el desarrollo hidráulico en la región septentrional del estado.

En la actualidad, el agua transportada al sur y oeste debe atravesar el Delta y sus ciénagas antes de llegar a las bombas que la envían a sus últimos usuarios. Periódicamente, agua dulce que fluye aguas abajo a través del Delta invierte su sentido y permite que agua salina de la bahía de San Francisco remonte curso arriba, hacia las bombas. Con lo que la calidad de las aguas destinadas al riego y las del propio Delta queda seriamente degradada.

El canal Peripheral ha encontrado muchos opositores en el norte de California, quienes, evidentemente, no reconocen que los contratistas del agua del State Water Project han pagado durante mucho tiempo todo el complejo de la presa de Oroville, en el río Feather, proyectado para ser el "nuevo" regulador del agua destinada al susodicho canal. Probablemente las bombas del Delta no puedan aportar la cantidad de agua contratada por el estado para su distribución, a menos que se construya el canal Peripheral. La oposición viene ahora de aquellos que sostienen que el agua pertenece al "área de su origen" y que quienes pagan por ella deben renunciar a sus derechos sobre la misma.

Resulta evidente que, para mantener y asegurar la viabilidad del riego agrícola a largo plazo, y en orden a proveerse de bastante agua para arrastrar las sales al océano u a otros sumideros naturales, debiera intensificarse el desarrollo de los recursos hídricos. Habría que empezar por potenciar las posibilidades locales y prestar mayor atención a sus fuerzas. Habría que pensar luego en derivaciones a gran escala, por la sencilla razón de que vastas extensiones del oeste, incluidos los altiplanos de Texas y Nuevo México, hasta Nebraska, al norte, no tienen bastante agua. Todas aquellas zonas del norte de México, Estados Unidos y Canadá, con potencial de regadío, deberían tener un adecuado suministro de agua; lo que implica un caudal suficiente para arrastrar todas las sales al océano y otros sumideros naturales. Debiera reconocerse también que pueden hacerse grandes ahorros si se aumenta la escala; así, al doblar el caudal de agua que debe aportar un proyecto, no se multiplica el coste por dos, sino que se incrementa en un factor menor de 1,5.

A lo largo de los años se han ido avanzando múltiples proyectos visionarios para derivar agua desde los ríos del húmedo noroeste de los Estados Unidos hasta regiones más áridas del sur. De acuerdo con el proyecto del ingeniero William G. Dunn se trasvasarían 2960 millones de metros cúbicos al año del río Snake, en Idaho, a un punto más abajo de la presa de Hoover, en el curso del Colorado, un ramal de unos 960 kilómetros. El río Snake, que vierte alrededor de 37.000 millones de metros cúbicos por año al río Columbia, es el doceavo río más grande de los Estados Unidos. El caudal actual del Colorado, por debajo de la presa de Hoover, ronda los 17.250 millones de metros cúbicos por año, de los que 5430 irían a California una vez terminado el Central Arizona Project, cuyos trabajos comenzarán en 1985. Otro plan, más ambicioso, es el de Frank Z. Pirkey, experimentado ingeniero, que propone transferir 18.500 millones de metros cúbicos por año del río Columbia al lago Mead, detrás de la presa de Hoover. En el plan de Pirkey, el agua se bombearía primero a 1500 metros, sobre las montañas, hasta el lago Goose, en la frontera de Oregón y California y, de allí, hasta el lago Shasta, tras la presa de Shasta, en California septentrional, para finalizar su viaje en el lago Mead. En su trayecto iría cediendo cantidades importantes para el riego.

El más audaz de los planes es, con diferencia, el propuesto en 1964 por la compañía Ralph M. Parsons, de Pasadena, California, una de las constructoras de la presa de Hoover a principios de la década de 1930. Conocido por North American Water and Power Alliance (NAWAPA), este proyecto traería agua de Alaska y del Canadá septentrional hasta muchas regiones del Canadá, Estados Unidos y México. Las centrales hidroeléctricas que se instalarían a lo largo del recorrido generarían mucha más potencia que la necesaria para el bombeo. El área de drenaje total, concebida en el proyecto, cubre unos 3,3 millones de kilómetros cuadrados de zonas de abundante pluviosidad. Con una escorrentía total superior a los 985.000 millones de metros cúbicos por año, NAWAPA desviaría 200.000 millones de metros cúbicos al sur, para consumo y regulación hidráulica. El sistema total, cuyo importe se estima en más de 200.000 millones de dólares, supondría 30 años de obras y, una vez terminado, suministraría un excedente de energía hidroeléctrica de alrededor de 70.000 megawatt, es decir, igual al 25 por ciento de la producción media actual de los Estados Unidos.

Aunque se trata de un proyecto de magnitudes formidables, con enormes barreras de tipo político a superar antes de aprobarse, NAWAPA constituye, en mi opinión, la única idea que podría permitir a los ríos pequeños del oeste alcanzar el equilibrio salino necesario para garantizar a largo plazo la salud a la agricultura occidental, de la que depende en buena parte Norteamérica. Si no se procura que los ríos pequeños prosigan en su función natural de vaciar sal al mar, los campos de hoy acabarán siendo terreno yermo y salino.

La atmósfera de Venus

Tras diez años de exploración se ha llegado a la conclusión de que está compuesta casi totalmente de dióxido de carbono. Sus nubes de ácido sulfúrico son arrastradas por vientos que alcanzan grandes velocidades

Gerald Schubert y Curt Covey

Hasta hace unos decenios, se desconocía la atmósfera de Venus. Trescientos años de observaciones con telescopios sólo habían revelado que el planeta estaba recubierto por una capa continua de nubes aparentemente uniformes y sin mayor relieve. Las observaciones realizadas hoy día desde la Tierra se han extendido hasta las longitudes de onda del ultravioleta. En esta región del espectro electromagnético se distinguen ciertos detalles de las nubes. Además, desde 1967, una serie de vehículos espaciales interplanetarios han hecho observaciones a distancias relativamente cortas y un total de 13 sondas han penetrado profundamente en la atmósfera de Venus, antes de que el calor de la misma acabara por inutilizarlas. En particular, dos de los vehículos espaciales de la serie Venera, lanzados por la Unión Soviética, sobrevivieron lo suficiente para enviar datos desde la misma superficie, donde la temperatura media anual, de 460 grados Celsius, se basta para fundir metales tales como el zinc. Un satélite espacial norteamericano, el vehículo orbital Pioneer Venus, que llegó hasta el planeta en diciembre de 1978, continúa en órbita a su alrededor transmitiendo información a la Tierra.

Se sabe ya que en la atmósfera de Venus predomina dióxido de carbono (un 96 por ciento). El resto es nitrógeno con indicios de otras substancias, vapor de agua incluido. La masa de la atmósfera de Venus supera en más de noventa veces la masa de la atmósfera de la Tierra; por tanto, la presión en la superficie de Venus supera, en más de 90 veces, la presión en la superficie de la Tierra. Equivale a la presión que se registra a la profundidad de un kilómetro en los océanos de la Tierra. Sabemos también que las nubes de la atmósfera de Venus forman capas continuas a una altura que podríamos situar entre 45 y 60 kilómetros. (En promedio, sólo la mitad del cielo terrestre está cubierto de nubes que se encuentran a una altura inferior a 10 kilómetros.) Basándose en la concentración y tamaño de las partículas en suspensión, los investigadores distinguen tres capas de nubes. Se supone que las partículas pueden diferir de una capa a otra, pero las únicas partículas identificadas hasta ahora son gotas líquidas compuestas de ácido sulfúrico con mezcla de agua.

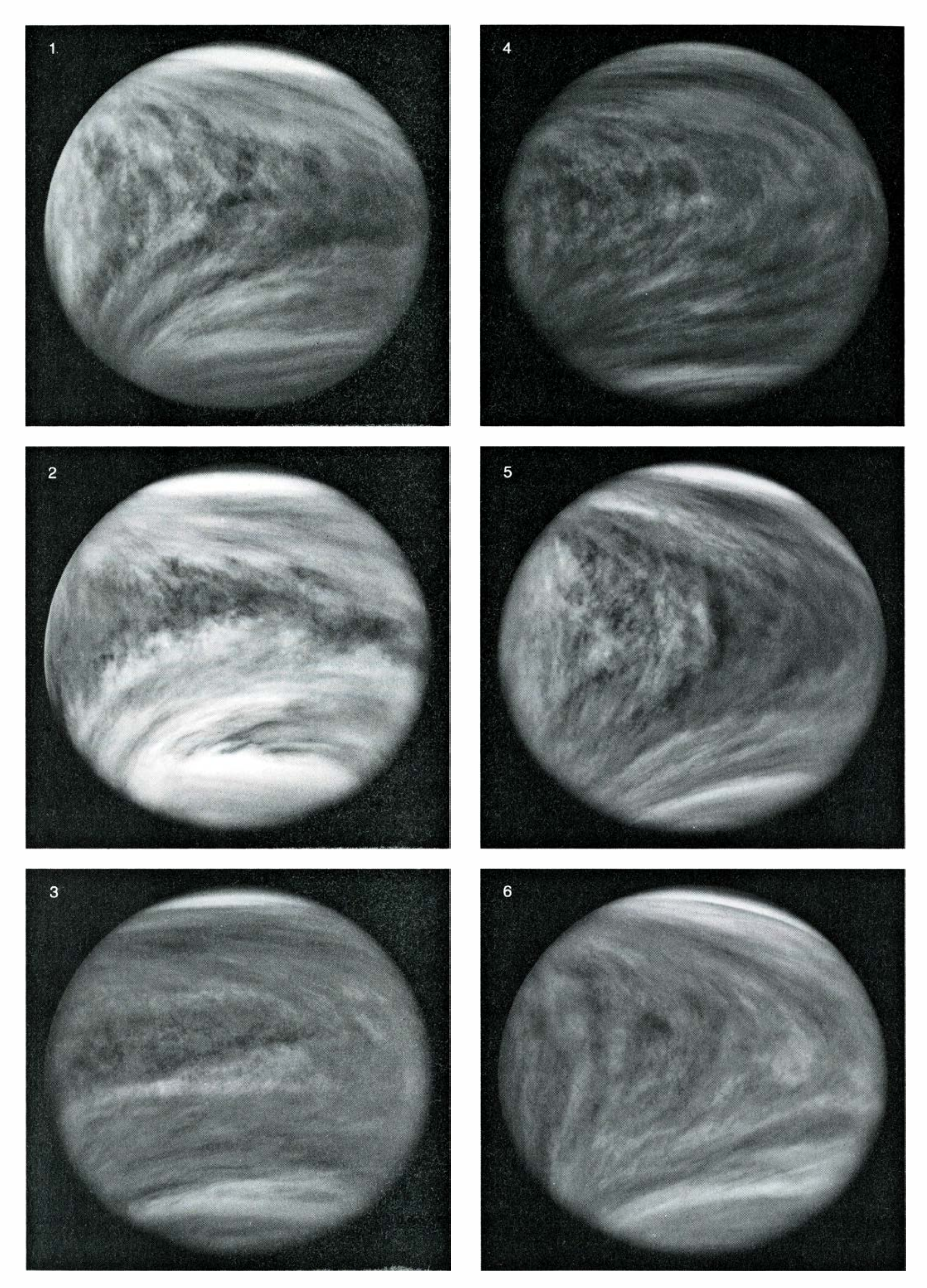
Los vientos de Venus están dominados por una circulación planetaria de Este a Oeste, que alcanza una velocidad de 100 metros por segundo (360 kilómetros por hora) a la altura de las cimas de las nubes. A esa velocidad, una partícula de la atmósfera daría la vuelta a Venus en cuatro días terrestres. El propio planeta gira también de Este a Oeste, pero tarda 243 días terrestres en completar una sola vuelta. En una palabra, la atmósfera de Venus está en super-rotación: a la altura de las cimas nubosas se mueve con velocidad superior a 60 veces la del planeta. En contraste, la Tierra gira de Oeste a Este y la atmósfera terrestre (considerada a escala global) gira sincrónicamente con el planeta sólido situado en su interior.

El centro de interés en la investigación de la atmósfera de Venus está cambiando. No preocupa tanto descubrir cómo es la atmósfera de Venus, cuanto explicar por qué ha de ser tan diferente de la de la Tierra, a pesar de que ambos planetas vienen casi a coincidir en tamaño y masa.

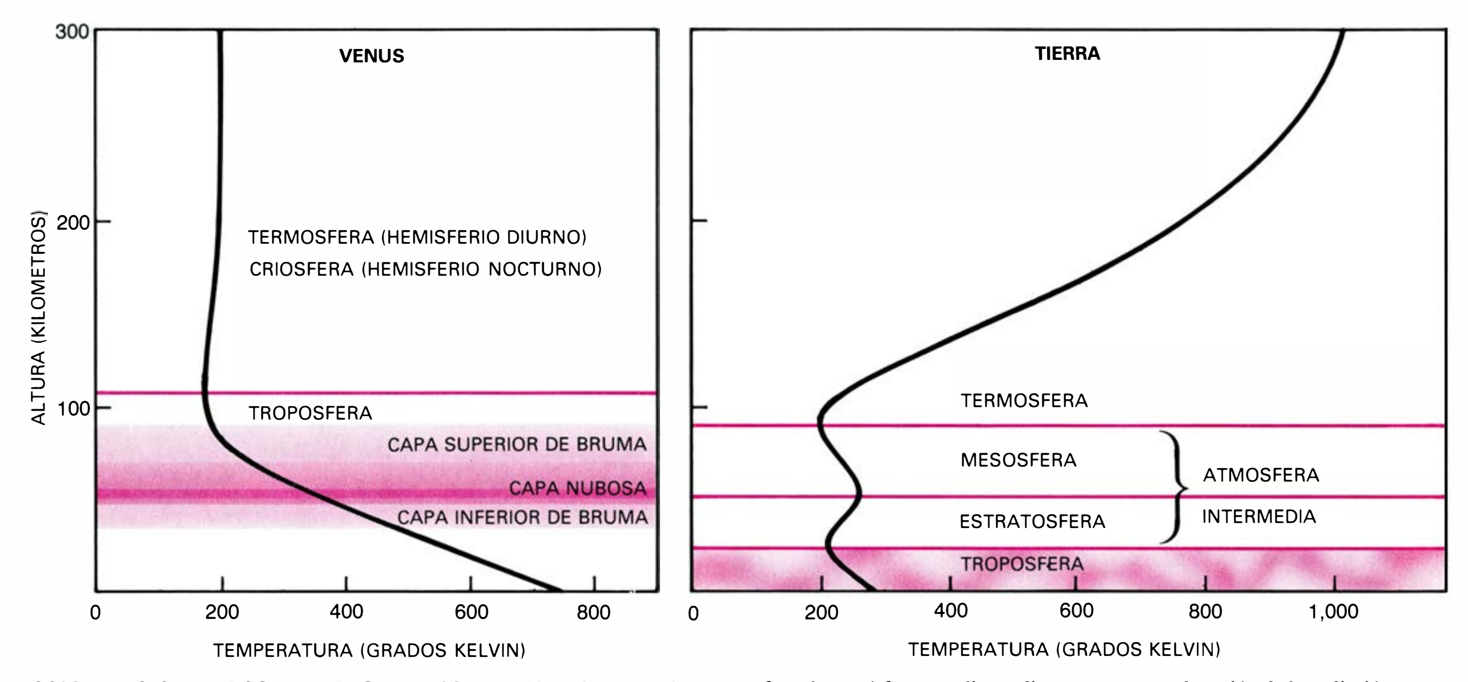
La atmósfera de un planeta queda bien caracterizada por la manera como su temperatura varía con la altura. En Venus, el carácter de la variación divide la atmósfera en dos regiones. En la más baja, que se extiende desde la superficie hasta una altura de 100 kilómetros, la temperatura decrece con la altura. Esta región se llama troposfera, por analogía con la parte baja de la atmósfera de la Tierra (los primeros 10 kilómetros), donde la temperatura también disminuye. En la mayor parte de la altura de la troposfera de Venus, la temperatura decrece a razón de unos 10 grados Celsius por cada kilómetro de altitud. En superficie, la temperatura de 460 grados cambia poco del día a la noche. Hay que hacer medidas a la altura de las nubes para poder apreciar variaciones diurnas. La razón de esta falta de variación es clara. Por ser muy densa, la baja atmósfera posee una gran inercia térmica: puede almacenar una gran cantidad de calor. Por la misma razón, no debe esperarse hallar una diferencia apreciable entre las temperaturas diurnas y las nocturnas en los océanos de la Tierra.

Las altas temperaturas bajo la capa nubosa, que culminan en la temperatura en superficie de 460 grados, no pueden atribuirse simplemente al hecho de que Venus está más cerca del Sol que la Tierra; en realidad, la omnipresente capa nubosa en Venus es tan reflectora que el planeta absorbe menos radiación solar que la Tierra. Ade-

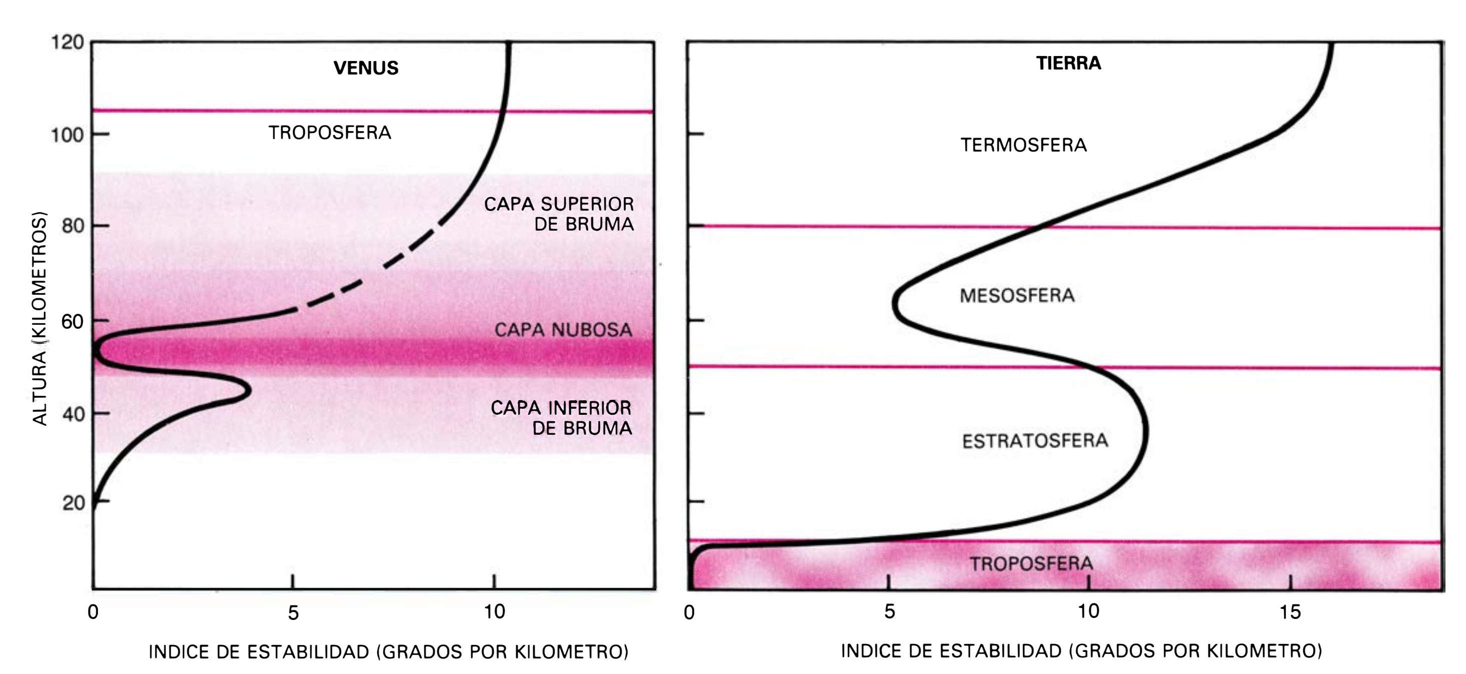
VIENTO DOMINANTE EN VENUS, reflejado en la serie de fotografías de la página opuesta, que registran la imagen del planeta en la banda ultravioleta del espectro. Las fotografías fueron realizadas en días consecutivos por el vehículo orbital Pioneer Venus, de los Estados Unidos, que inició su trayectoria alrededor del planeta en diciembre de 1978. En la primera fotografía, tomada el 15 de febrero de 1979, una configuración en forma de *Y* en las nubes de Venus se abre hacia el Oeste del planeta. El trazo inferior de la *Y* es una banda ancha y oscura que ciñe el ecuador. En la segunda fotografía, el vértice de la *Y* está cerca del borde occidental del planeta; en la tercera, el vértice está fuera del campo de visión; en la cuarta, los brazos están regresando; en la quinta, tomada el 19 de febrero, vuelve a verse la *Y* completa. El viento dominante es, pues, una rotación de la atmósfera de Este a Oeste, de sólo cuatro días terrestres, que arrastra consigo las configuraciones de las nubes alrededor del planeta. El propio Venus gira también hacia el Oeste, pero la rotación del planeta sólido prolonga en más de 60 veces el tiempo invertido por las configuraciones atmosféricas. La fotografía final muestra a Venus el día 20 de febrero de 1979. Las fotografías fueron proporcionadas por Larry D. Travis y Anthony Del Genio, del Instituto Goddard.


1
4
2
5
3
6

más, como lo han demostrado las sondas Pioneer Venus y la serie de sondas Venera, sólo una pequeña fracción de la radiación absorbida por el planeta penetra a través de las nubes y la espesa baja atmósfera hasta alcanzar la superficie. ¿A qué se debe que Venus permanezca caliente a pesar de todo ello? Sencillamente, a que la superficie vuelve a radiar la energía solar en la parte infrarroja del espectro electromagnético; los componentes de la atmósfera tales como el dióxido de carbono, el dióxido de azufre, el vapor de agua y las partículas que forman las nubes son eficaces absorbentes de la radiación infrarroja, y el calor queda así retenido en la troposfera. En resumen, la troposfera de Venus se calienta en virtud del efecto de invernadero, según propusieron Carl Sagan, de la Universidad Cornell,



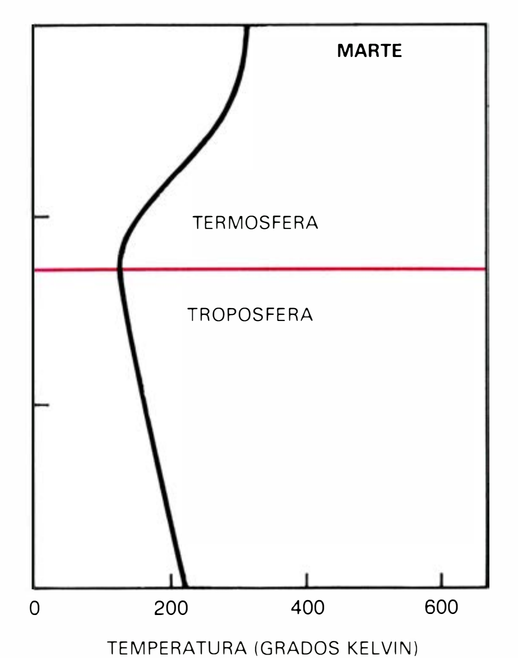
COMPARACION DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA de las atmósferas de Venus, la Tierra y Marte. La atmósfera de Venus (*gráfica de la izquierda*) tiene dos subdivisiones. En la inferior, llamada troposfera, la atmósfera se calienta principalmente como consecuencia del efecto de invernadero (aprisionamiento del calor radiado por la superficie). De aquí que la temperatura decrezca al aumentar la altura. En la subdivisión superior, llamada termosfera, la atmósfera se calienta directamente por absorción de la radiación solar; la temperatura aumenta con la altura. El perfil de Venus es un promedio de medidas realizadas durante el día y durante la noche; en realidad se podría decir que la termosfera de Venus desaparece durante la noche porque la tempertura de la atmósfera decrece entonces monótonamente al aumentar la altura. La atmósfera de Marte (*gráfica de la derecha*) tiene las mismas dos



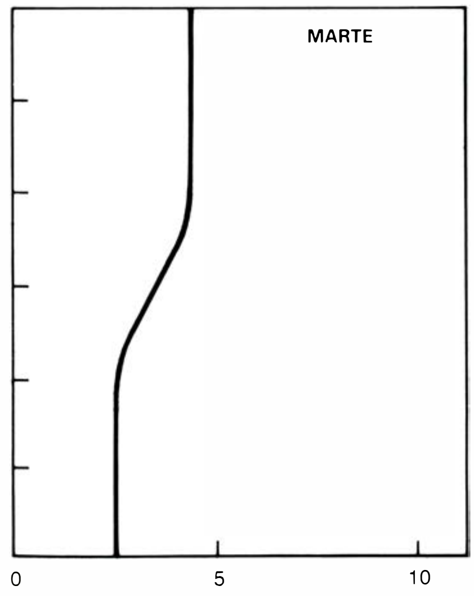
PERFILES DE ESTABILIDAD DE ESTRATIFICACION de las atmósferas de Venus, la Tierra y Marte, que revelan la intensidad a la que la atmósfera a una altura dada resiste la convección. A cualquier altura, una partícula atmosférica debe soportar el peso de la atmósfera situada sobre ella. Así, la presión atmosférica decrece con la altura. Una partícula impulsada hacia arriba se dilatará, y, por ende, se enfriará. Si el gradiente de enfriamiento adiabático (o enfriamiento causado solamente por la reducción de presión) excede el gradiente de temperatura de la atmósfera, la partícula desplazada se encontrará más fría que su nuevo entorno y, en consecuencia, descenderá hacia su nivel original. En estas circunstancias, la atmósfera es hidrostáticamente estable (o estable frente a la convección). Si el gradiente adiabático es inferior al gradiente de temperatura, la partícula desplazada seguirá estando más caliente que su entorno. Será, pues, menos densa que él y continuará ascendiendo. La atmósfera es por tanto inestable. La ilustración representa la diferencia entre el gradiente adiabático y el gradiente de temperatura. Las cifras positivas indican estabilidad, en tanto que el cero sugiere inestabilidad. (Un valor negativo no podría persistir porque se establecería la convección y tendería a restaurar la estratificación indiferente.) En la Tierra, la estabi-

y James B. Pollack, del Centro Ames de Investigación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA).

Encima de la troposfera hay una atmósfera superior más delgada. Durante el día, esa región se calienta directamente por la radiación ultravioleta procedente del Sol; y, allí, la temperatura aumenta, por tanto, con la altura. Tal aumento se observa también en la alta atmósfera de la Tierra, por cuya razón recibe el nombre de termosfera. En la Tierra, la termosfera está presente durante el día y la noche: la rotación en gran escala de la atmósfera con el planeta lleva consigo la alta atmósfera calentada durante el día al hemisferio nocturno del planeta. En el hemisferio nocturno de Venus, sin embargo, la termosfera desaparece; la alta atmósfera se enfría rápidamente después de la puesta del Sol, hasta alcanzar temperaturas muy por debajo de las registradas en la troposfera. La desaparición nocturna de la termosfera de Venus fue descubierta en el curso de la misión Pioneer Venus. No se ha acertado todavía con ninguna explicación del fenómeno. La alta atmósfera de Venus gira con rapidez suficiente para transportar una gran cantidad de calor al hemisferio nocturno del planeta, pero, sea como sea, ese calor se pierde. En cualquier caso, hemos sugerido que la alta atmósfera del hemisferio nocturno, que es la parte más fría de Venus, se llame criosfera.



subdivisiones que aparecen en la de Venus. La atmósfera de la Tierra (*gráfica del centro*) es más complicada que las otras; posee una subdivisión intermedia en la que el perfil de temperatura alcanza un máximo local como resultado de la absorción de radiación ultravioleta por la capa de ozono reinante.



lidad de la estratosfera limita la mezcla convectiva (y, por tanto, las nubes) a la troposfera. En Venus, la distribución es semejante, aunque debajo de las nubes hay una capa moderadamente estable. La endeblez de la atmósfera de Marte no permite que llegue a desarrollarse inestabilidad por convección. Los datos de las atmósferas de Venus y Marte fueron obtenidos por vehículos espaciales. R. Walterscheid aportó los correspondientes a la Tierra.

La diferencia básica entre la atmósfera de Venus y la de la Tierra estriba en que la atmósfera de aquélla está caliente en su parte inferior y fría en su cima, mientras que, en la Tierra, se verifica lo contrario. La baja atmósfera de nuestro planeta carece de masa suficiente para producir un efecto de invernadero grande. Una segunda diferencia radica en que la atmósfera terrestre tiene una región intermedia donde la temperatura alcanza un máximo local. El calentamiento allí resulta de la absorción de radiación ultravioleta por una capa rica en ozono.

En la troposfera de Venus, las variaciones horizontales de temperatura son mucho menores que la variación vertical. Las máximas diferencias con la latitud detectadas por las sondas Pioneer se dieron al nivel de las nubes más altas. Aquí, la sonda septentrional, que penetró en la atmósfera a la latitud de 60 grados, midió temperaturas de 10 a 20 grados más bajas que las medidas por otras tres sondas Pioneer. Las temperaturas más altas las registró una sonda que penetró en la atmósfera cerca del ecuador. La explicación de esta distribución en Venus es la misma que en la Tierra. En la región ecuatorial de cada planeta, la radiación solar penetra en la atmósfera incidiendo casi perpendicularmente a la superficie. De aquí que la cantidad de radiación solar recibida por unidad de área sea máxima cerca del ecuador. En Venus, la radiación solar incidente se absorbe, principalmente, en las regiones superiores de las nubes.

Entre una altura de 70 kilómetros y el comienzo de la alta atmósfera a 100 kilómetros, el gradiente de temperaturas se invierte entre el ecuador y el polo: a esas cotas, las regiones polares están generalmente más calientes que el ecuador. Este cambio, descubierto durante la misión Pioneer Venus, no se ha explicado todavía. Se sabe que en la Tierra se observa un cambio semejante del gradiente de temperatura, siendo el polo de invierno la parte más caliente de la atmósfera media. Tampoco aquí se conoce la causa.

Las variaciones de temperatura con respecto a la longitud en la troposfera de Venus son mucho menores que las variaciones con respecto a la latitud. Esto se puso de manifiesto a raíz de las medidas tomadas por otras dos sondas de la misión Pioneer Venus, las sondas diurna y nocturna, que penetraron en la atmósfera a la misma latitud (30 grados Sur), aunque estaban separadas por más de 110 grados de longitud. Las temperaturas medidas por esas sondas, a cualquier altitud dada, nunca difirieron en más de 5 grados Celsius. En los primeros 10 o 20 kilómetros de la atmósfera, la pequeñez de estas diferencias síguese de la inercia térmica; la magnitud de la masa de la baja atmósfera es tal que retiene la mayor parte de su calor, incluso durante el largo período de oscuridad. A mayores alturas en la troposfera, la rápida circulación de Este a Oeste transporta calor alrededor del planeta y reduce las diferencias de temperatura.

Aunque las diferencias de temperatura horizontales son pequeñas, deben constituir, sin embargo, la fuente de las fuerzas que impulsan los movimientos atmosféricos. A este respecto, el gradiente según la latitud es particularmente importante. La energía solar que penetra en la atmósfera de Venus calienta el ecuador más que los polos. Por otro lado, la energía que el planeta emite en el infrarrojo posee virtualmente la misma intensidad en todas las latitudes a causa de las relativamente pequeñas variaciones de temperatura con la latitud. La descompensación entre la energía solar incidente y la energía infrarroja saliente enfriaría rápidamente los polos y calentaría el ecuador, si no fuese por los movimientos en gran escala de la atmósfera, que transportan calor desde el ecuador hacia los polos. Tales movimientos se encuentran también en la Tierra, aunque el desequili-

brio entre la radiación incidente y la emitida en los polos no llega al de Venus.

¿Cómo se mueve el calor en Venus desde el ecuador hacia los polos? Alguien podría pensar que cualquier partícula de la baja atmósfera en las latitudes ecuatoriales de Venus mostrará tendencia a ascender. Su lugar sería ocupado por partículas adyacentes que provendrían del Norte y del Sur. Acabaría por establecerse así una corriente constante, en la que la atmósfera fluyera hacia el polo a gran altura, transportando el exceso de calor. Tras calentar las regiones polares, la corriente descendería y fluiría entonces de nuevo hacia el ecuador a un nivel más bajo.

Se llama célula de Hadley a una circulación Norte-Sur de este tipo. Y, por los datos disponibles, se diría que, en Venus, se han formado células de Hadley al nivel de la capa nubosa. En particular, las fotografías en el ultravioleta tomadas por el vehículo espacial norteamericano *Mariner 10*, cuando pasó por la proximidad de Venus en 1974, mostraban movimiento hacia el polo en las cimas de las nubes, mientras que las medidas realizadas por las sondas Pioneer Venus indicaban vientos hacia el ecuador cerca de la base de la capa de nubes. La célula de Hadley estaría en Venus situada entre las alturas correspondientes a la capa de nubes, porque se absorbe allí la mayor parte de la radiación solar incidente. La célula se extendería continuamente desde el ecuador hacia el polo, habida cuenta de que la lenta rotación del planeta apenas si contribuye a desviar la circulación de su trayectoria Norte-Sur. En la Tierra hay una célula de Hadley inmediatamente encima de la superficie, lugar donde se absorbe la mayor parte de la energía solar. Puesto que nuestro planeta gira rápidamente, la célula de Hadley terrestre no alcanza más allá de las latitudes medias, a partir de las cuales el transporte de calor hacia el polo se efectúa mediante complicados movimientos ondulatorios llamados vórtices baroclínicos.

Una pequeña fracción de la energía solar que alcanza Venus se absorbe en su superficie. Y como esta energía se deposita predominantemente en el ecuador, debe también ser transportada hacia los polos. Sin embargo, es improbable que la célula de Hadley al nivel de las nubes participe en dicho transporte. En el análisis de las circulaciones en célula de Hadley, el factor más importante es el gradiente adiabático, que representa el enfriamiento o calentamiento que experimenta una partícula de la atmósfera a raíz de la dilatación o contracción cuando es desplazada hacia arriba o hacia abajo. Si se empuja una partícula hacia arriba, por ejemplo, entra en una región donde la presión es más baja, y, por tanto, se dilata y se enfría. A grandes rasgos, el calor de la partícula se distribuye en un volumen mayor. La partícula puede ahora estar más fría que la atmósfera circundante; en cuyo caso adquirirá una densidad mayor que el ambiente y tenderá a descender hacia su nivel original. Bajo estas condiciones, la estratificación de la atmósfera es estable. Por otro lado, la partícula puede estar todavía más caliente (a pesar del enfriamiento adiabático) que la atmósfera envolvente. En este caso, continuará ascendiendo. La estratificación de la atmósfera es entonces inestable y propicia a la subversión y al transporte de calor por convección.

Para evaluar la estabilidad de estratificación de una atmósfera, por tanto, se comparan dos magnitudes: la variación de temperatura por unidad de altura en la atmósfera y el enfriamiento por unidad de altura debido a la elevación adiabática. Siempre que el último sea menor, la atmósfera resultará inestable. Cuando se analiza de esta manera la atmósfera de Venus, se encuentra que inmediatamente debajo de la capa nubosa hay una capa muy estable de unos 20 kilómetros de espesor. Como los movimientos verticales quedan frenados en esta capa, parece dudoso que una única célula de Hadley pueda extenderse desde el suelo hasta las nubes.

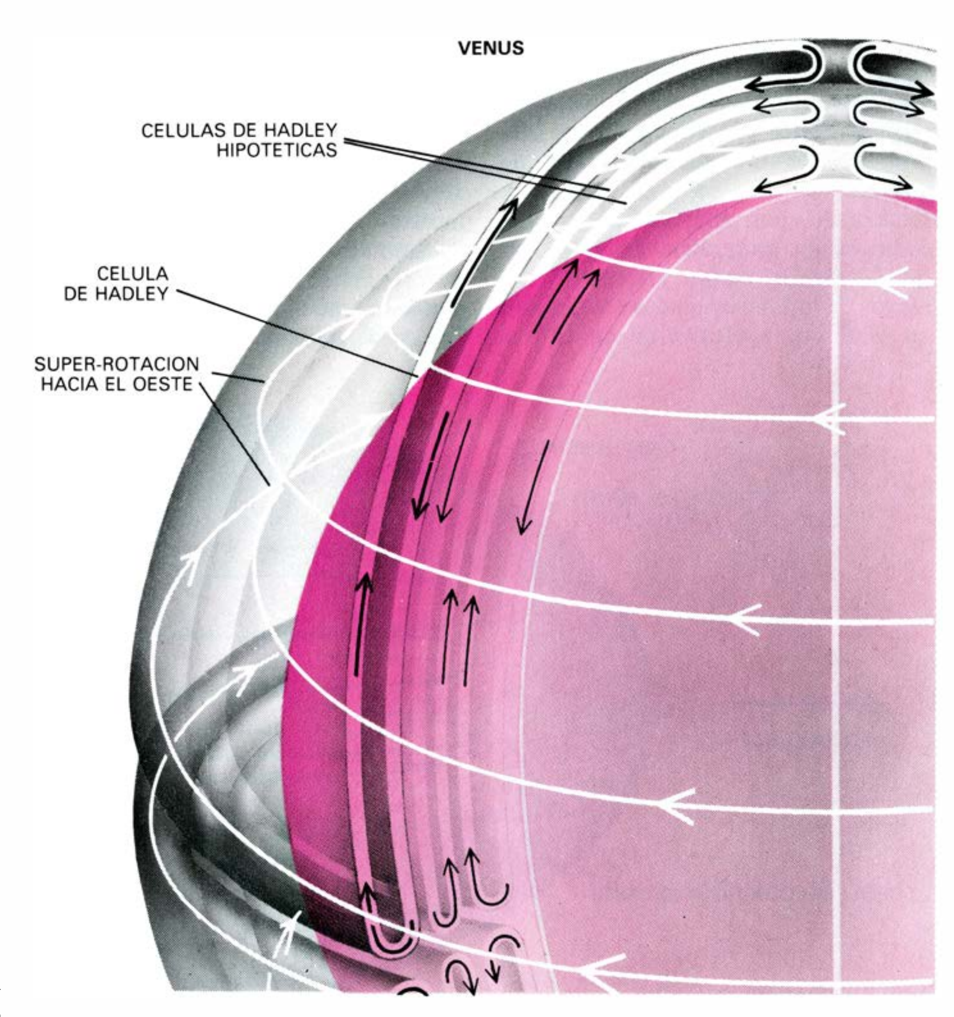
Podría haber otra célula de Hadley actuando cerca de la superficie, pero tal existencia se inscribe en el terreno de la especulación. Los vientos de Norte a Sur, medidos bien dentro de la atmósfera por las sondas Pioneer Venus, son débiles; tienen magnitudes de sólo algunos metros por segundo, y sus direcciones no revelan una configuración definida en gran escala. De existir una célula de Hadley en la parte media de la atmósfera, la circulación media Norte-Sur en la atmósfera de Venus tendría que estar compuesta por tres células de Hadley, al menos, dispuestas una encima de la otra, porque la célula al nivel de las nubes y la célula en la parte interior inducirían al menos una célula entre ellas girando en sentido inverso. Si no hay célula de Hadley en la parte

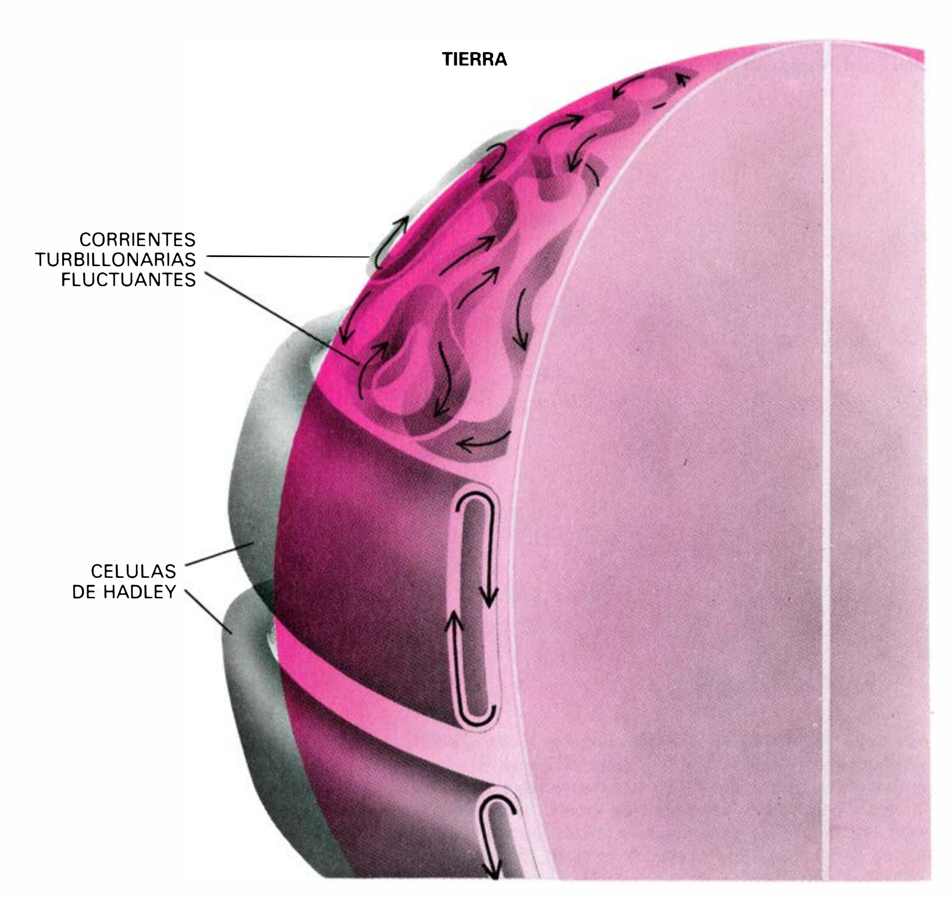
BALANCE DE RADIACION entre la energía solar incidente y emergente. Este balance se logra en Venus, la Tierra y Marte porque la atmósfera de cada planeta transporta calor de su ecuador a sus polos. En el ecuador, la cantidad de radiación que cada planeta recibe del Sol (*curvas negras*) es superior a la cantidad que emite en forma de radiación infrarroja (*líneas coloreadas*). El exceso es transportado hacia los polos. En éstos, la cantidad de radiación que el planeta emite excedería a la que recibe, si no fuera por el transporte hacia los polos. Las curvas de Marte son hipotéticas porque el balance de radiación no se ha medido a fondo. La diferencia entre la curva de la radiación incidente y la que representa la radiación emitida en Marte es pequeña: su atmósfera resulta demasiado tenue para almacenar mucho calor.

baja, la energía solar que penetra hasta la superficie debe ser transportada hacia el polo por el efecto neto de movimientos turbulentos.

Puesto que Venus gira lentamente, podría pensarse que la circulación Norte-Sur constituyera la totalidad de la circulación atmosférica. Por un lado, las diferencias estacionales deben ser insignificantes en el planeta. La órbita elíptica de Venus difiere sólo ligeramente de una circunferencia, por lo que el planeta mantiene una distancia casi constante del Sol. Además, su eje de rotación es casi perpendicular al plano de la órbita. A cualquier latitud, por tanto, la cantidad de energía solar recibida varía muy poco en el curso del año.

De manera sorprendente, la sencillez que cabía esperar en la configuración de la circulación de la atmósfera está en contradicción con las observaciones. La circulación media Norte-Sur queda enmascarada por el viento de Este a Oeste, mucho más fuerte, que comienza a unos 10 kilómetros por encima de la superficie y se extiende hasta alturas de 90 kilómetros o más. Hasta la altura de las nubes, la velocidad del viento aumenta con la altura. Alcanza una velocidad de 30 metros por segundo a una altura de 30 kilómetros y de 100 metros por segundo a la altura de las nubes de 60 kilómetros. A la última velocidad citada, el viento da lugar a la superrotación de cuatro días antes mencionada, que señalan las marcas característi-

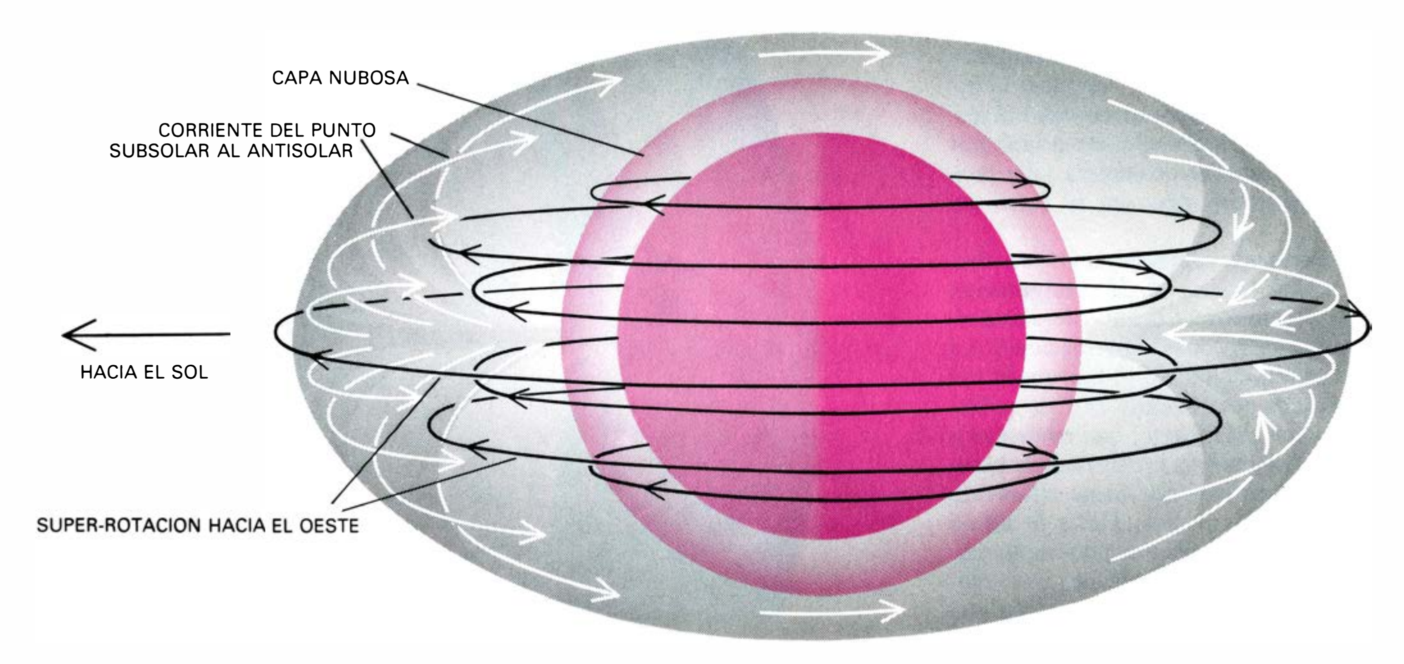




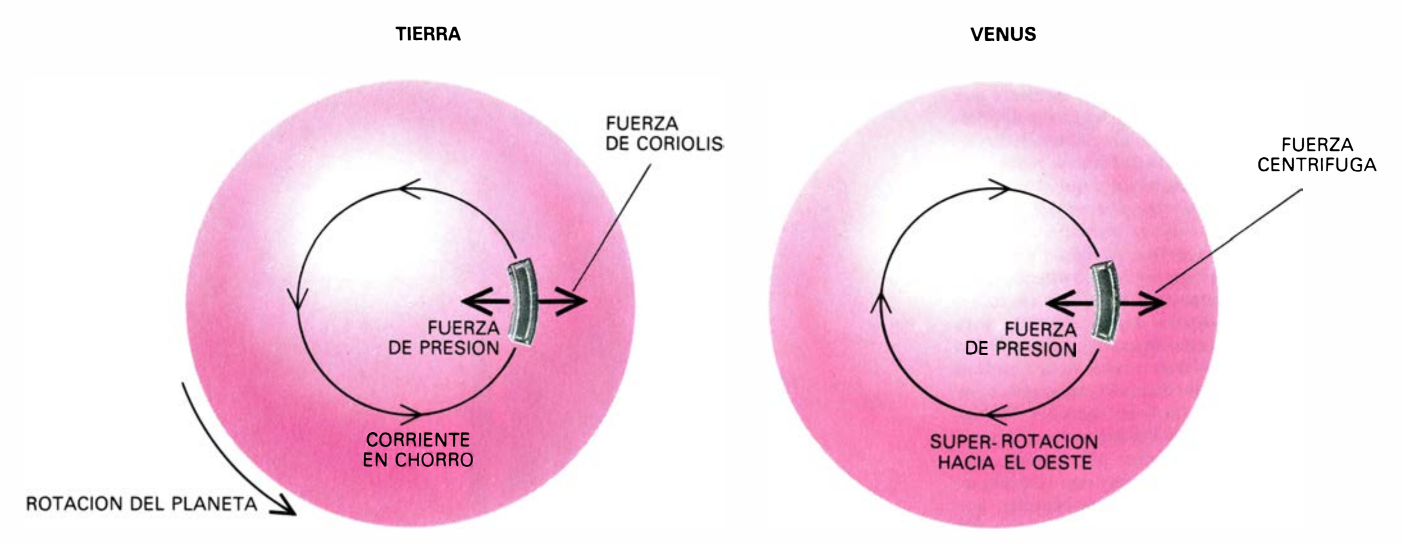
DISTRIBUCION DE VIENTOS en la baja atmósfera de Venus, que difiere marcadamente de la distribución en la Tierra. En Venus (*figura de arriba*), los datos recogidos por las sondas sugieren que a alturas de las nubes de unos 60 kilómetros, la atmósfera circula en forma de una corriente que asciende en el ecuador, se dirige hacia el polo, desciende cerca de éste y retorna al ecuador. Esta circulación, que se llama célula de Hadley, representa el transporte hacia el polo del calor que el Sol deposita en las nubes. Se dibujan dos células de Hadley más, pero su existencia es hipotética. La célula más próxima a la superficie puede ser necesaria para el transporte de calor en la baja atmósfera; la capa estable inmediatamente debajo de las nubes parece impedir que el calor depositado cerca de la superficie ascienda hasta alcanzar la altura de las nubes. Si la célula inferior existe, debe entonces haber una célula intermedia en la que el giro tiene lugar en sentido opuesto al de las otras dos. El flujo Norte-Sur en las células de Hadley muestra una velocidad de sólo algunos metros por segundo. Superpuesta a este movimiento, hay una rotación de la atmósfera hacia el Oeste (*líneas blancas*), que alcanza una velocidad de aproximadamente 100 metros por segundo a la altura de las nubes. En la Tierra (*figura inferior*) hay una célula de Hadley cerca de la superficie, pero alcanza sólo hasta las latitudes medias, donde la rotación de la Tierra inhibe la circulación Norte-Sur. Desde allí, el transporte de calor hacia el polo resulta como un efecto neto de fluctuaciones turbillonarias cambiantes.

cas en las fotografías ultravioleta de las nubes. A la altura de las nubes, además, la superposición de la circulación hacia el Oeste y la circulación de Hadley, más débil, origina un vórtice que converge en cada polo. El vórtice fue reconocido, por primera vez, en una composición fotográfica del polo Sur que Verner E. Suomi y Sanjay S. Limaye, de la Universidad de Wisconsin en Madison, construyeron en 1978 a partir de fotografías ultravioleta de Venus tomadas por el *Mariner 10* a latitudes más cercanas al ecuador.

La super-rotación había quedado claramente establecida cuando ciertas observaciones, realizadas desde la Tierra, mostraron que había configuraciones, en gran escala, de la atmósfera de Venus que daban la vuelta al planeta aproximadamente una vez cada cuatro días. Las configuraciones se podían apreciar en las fotografías ultravioleta del planeta. Sin embargo, hasta que las sondas Venera y Pioneer Venus midieron la velocidad del viento, no se podía estar seguro de si el movimiento de las configuraciones ultravioleta representaba movimiento en bloque de la atmósfera o era, por el contrario, la propagación de una onda –un rizo, por decirlo así– en una atmósfera plácida por lo demás. En la actualidad se acepta generalmen-



SE CREE QUE LOS VIENTOS DE LA ALTA ATMOSFERA de Venus resultan de la superposición de dos corrientes básicas: la rotación hacia el oeste de la atmósfera (*líneas negras*) y una circulación simétrica (*líneas blancas*), en la que los vientos ascienden en el hemisferio iluminado del planeta y descienden en el hemisferio nocturno. Aunque los vientos en la alta atmósfera de Venus no se han medido por un método directo, la superposición representada parece confirmada por medidas que indican que la densidad de la alta atmósfera es mínima en un punto del hemisferio nocturno del planeta situado bastante hacia el Oeste del punto opuesto al Sol. Es como si la corriente hacia el Oeste estuviera deformando continuamente la corriente descendente.



EL BALANCE DE FUERZAS que mantiene los movimientos atmosféricos en un planeta en rotación rápida (tal como la Tierra, Marte, Júpiter o Saturno) difiere del balance en un planeta en rotación lenta como Venus. En cada caso, la mayor cantidad de calor recibida en el ecuador del planeta establece un gradiente de presión que impulsa a la atmósfera hacia el polo. En la Tierra (*izquierda*), la fuerza bárica está compensada principalmente por la de Coriolis, o fuerza desviadora de una partícula de la atmósfera por hallarse sobre una esfera en rotación, que actúa perpendicularmente a la trayectoria. La propia corriente en chorro terrestre se mantiene por este balance; la fuerza de Coriolis impulsa el chorro hacia el Ecuador y equilibra la fuerza de presión que lo impulsa hacia el polo. Esta situación se llama balance geostrófico. En Venus (*a la derecha*), la fuerza de Coriolis es despreciable. Por otra parte, el movimiento de una partícula que gira en torno al planeta como parte de la rotación de la atmósfera hacia el Oeste somete a ésta a una fuerza centrífuga que equilibra la fuerza de presión hacia el polo, tendiendo a alejar la partícula del eje de rotación del planeta. Esta situación se llama balance ciclostrófico.

te que las configuraciones en gran escala se deben a ondas planetarias, pero que los rizos se propagan lentamente con respecto a la rotación de la atmósfera. Lo que impulsa en realidad a esas configuraciones a rodear el planeta es el viento del Este.

Sigue siendo difícil determinar la naturaleza precisa de las ondas planetarias. El problema estriba en que las substancias responsables de la absorción de radiación ultravioleta, que con ello hacen visibles las configuraciones, no se han podido identificar. En concreto: la absorción de radiación en las regiones de longitud de onda más corta del ultravioleta se puede atribuir al gas dióxido de azufre, pero queda por explicar la absorción en longitudes de onda mayores. El cuerpo absorbente a mayores longitudes de onda no puede ser ácido sulfúrico, principal componente de las nubes, pues el ácido sulfúrico es transparente para la radiación ultravioleta. Puede resultar que los absorbentes de radiación estén concentrados debajo de las cimas de las nubes, en regiones del planeta que son brillantes en el ultravioleta. Los movimientos verticales inducidos por el paso de una onda planetaria podrían entonces dar lugar a contraste en la imagen ultravioleta del planeta al hacer subir los absorbentes a una altura mayor, donde su absorción de la radiación ultravioleta ennegrecería algunas partes de la imagen.



PEQUEÑAS ONDAS ATMOSFERICAS, visibles en las fotografías ultravioleta tomadas por el vehículo orbital Pioneer Venus. Aquí las ondas son una serie de bandas diagonales oscuras en el centro de la imagen. Cada banda mide 1000 kilómetros de longitud y está separada unos 200 de su vecina lateral.

Tampoco se sabe bien hasta qué punto persiste la circulación de cuatro días, al aumentar la altura más allá de la cima de las nubes. Los datos del Pioneer Venus sugieren que la velocidad del viento alcanza un máximo de unos 150 metros por segundo a una altura de unos 70 kilómetros, para decrecer después, entre 70 y 90 kilómetros, con la altura.

Por encima de 150 kilómetros, la circulación se ha medido solamente por métodos indirectos. Así, un espectrómetro de masas a bordo del vehículo orbital Pioneer Venus mide la densidad de substancias tales como el nitrógeno, dióxido de carbono y helio en la parte alta de la atmósfera. Además, se sigue la trayectoria del vehículo orbital en su giro en torno al planeta. La lenta variación de su órbita se debe al rozamiento, que depende, a su vez, de la densidad de la atmósfera. A través de ambos métodos se ha demostrado que el lugar de mínima densidad en la alta atmósfera se encuentra al Oeste del punto opuesto al Sol en el hemisferio nocturno del planeta.

Este descubrimiento obliga a corregir una hipótesis anterior. Antes de la misión Pioneer Venus, muchos investigadores creían que la principal influencia sobre la circulación de la alta atmósfera de Venus sería el calentamiento de la parte de la atmósfera enfrentada al Sol. Bajo tal hipótesis, una partícula de la atmósfera superior ascendería en la región enfrentada al Sol, se movería hacia el hemisferio nocturno del planeta y descendería. La distribución general de la circulación sería, pues, simétrica alrededor de una recta que uniese el centro del Sol con el de Venus. Pero las mediciones tomadas por Pioneer Venus implican una configuración más complicada, en la que una super-rotación hacia el Oeste puede desviar la rama descendente de la circulación.

¿Por qué la circulación dominante a todas las alturas es una super-rotación hacia el Oeste? Persistimos así ante el mayor misterio relativo a la atmósfera de Venus. Lo lógico sería esperar que la atmósfera girase más o menos al mismo paso que el planeta sólido situado en su interior; si gira más deprisa, hay que imaginar un mecanismo mediante el cual se transporte momento cinético hacia arriba desde la superficie del planeta. En efecto, la superficie del planeta debe empujar la atmósfera.

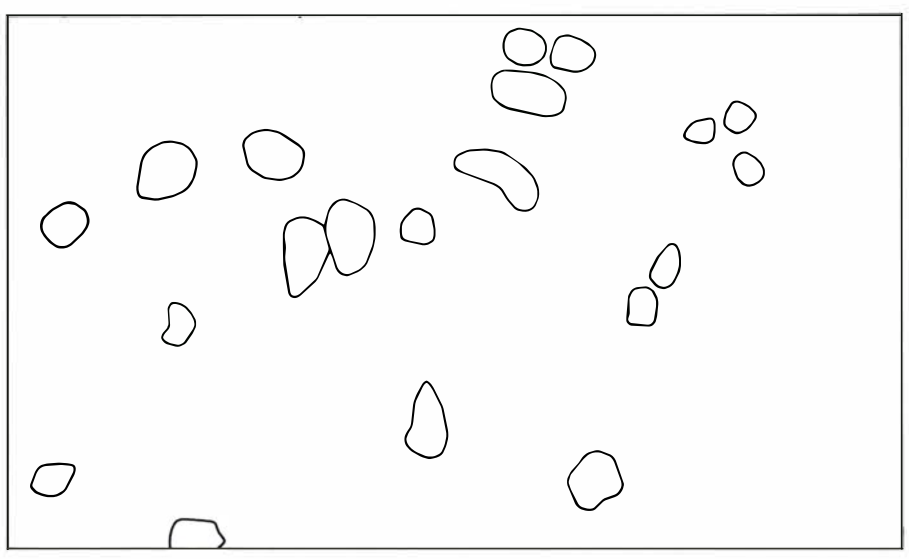
Un mecanismo que podría dar cuenta del transporte hacia arriba del momento cinético es el llamado efecto de llama móvil. Imaginemos una llama situada bajo un recipiente que contiene un fluido, y supongamos que inicialmente la llama está quieta. Tras algún tiempo, se desarrolla una célula de convección en la cual el fluido situado directamente encima de la llama asciende y el fluido que está alrededor del ascendente desciende. Como la llama es estacionaria, tanto la rama ascendente como la descendente de la célula de convección serán verticales. Imaginemos ahora que la llama se mueve continuamente de izquierda a derecha debajo del fluido. La parte baja de la célula acabará por situarse a la derecha de la parte alta. De aquí que las ramas

de la célula quedarán inclinadas: el fluido ascendente se moverá hacia la izquierda a medida que sube, y el descendente se moverá hacia la derecha a medida que baja. En los experimentos de laboratorio, realizados empleando un anillo de fluido, se ha observado que esos efectos se refuerzan entre sí y que la totalidad del fluido se mueve hacia la izquierda. El fluido avanza en dirección opuesta a la que lo hace la llama.

En Venus, que gira hacia el Oeste, el Sol se mueve hacia el Este en el cielo. Un efecto de llama móvil causado por ese movimiento del Sol hacia el Este podría crear, por tanto, la superrotación hacia el Oeste. Bien es verdad que el Sol está encima de la atmósfera de Venus, mientras que la llama subyace a la capa fluida. En Venus, sin embargo, la situación se complica por la presencia de las capas estables de la atmósfera, que tienden a oponerse a la formación de células de convección. Un ejemplo es la capa bajo las nubes. En un cálculo de uno de nosotros (Schubert) hecho con Richard E. Young, del Centro de Investigación Ames, las hipotéticas células de convección de Venus no sólo están inclinadas: su perfil vertical tiene la forma de un boomerang. De acuerdo con los cálculos, cabe deducir que tales células logren impartir a la atmósfera una rotación neta hacia el Oeste.

Otra hipótesis, sugerida por Peter J. Gierasch, de la Universidad Cornell, es que la circulación de Hadley transporta momento cinético hacia la parte alta de la atmósfera. En este enfoque, una partícula de la atmósfera que sube en el ecuador lleva consigo un momento cinético correspondiente al de la superficie en el ecuador, y, a medida que la partícula se mueve hacia el polo en una célula de Hadley, cede parte de su cantidad de movimiento a la atmósfera circundante. Cuando la partícula retorna a la superficie, vuelve a ganar momento cinético; y así continúa el ciclo. Tal vez el ciclo funciona, a pesar de que haya tres o más células de Hadley superpuestas. Un análisis de las fotografías ultravioleta, tomadas durante el paso del *Mariner 10* cerca de Venus, muestra que, a latitudes de 40 a 45 grados, los rasgos característicos en las nubes se estaban moviendo hacia el Oeste, en 1974, algo más deprisa de lo que se moverían si la atmósfera estuviera girando en rotación rígida, esto es, como un cuerpo sólido. William B. Rossow y sus colaboradores, del Instituto Goddard de Estudios Espaciales, han sugerido que el momento cinético transportado hacia arriba por la circulación de Hadley podría haber producido ese chorro y que la turbulencia en la vecindad del chorro podría repartir el momento cinético por toda la atmósfera. En los datos del Pioneer Venus, sin embargo, no se ha encontrado tal chorro.





CELULAS DE BORDES BRILLANTES en el hemisferio diurno de Venus, visibles en una fotografía ultravioleta tomada por el vehículo espacial *Mariner 10* cuando pasó por la cercanía del planeta en 1974. Cada célula tiene un diámetro de algunos cientos de kilómetros y algunas de ellas son decididamente poligonales. Se cree que son células de convección, es decir, lugares donde la atmósfera se subvierte. La subversión es presumiblemente impulsada por energía solar absorbida cerca de las cimas de las nubes. Para obtener un conocimiento más completo habrá que aguardar a la identificación de todos los componentes escasos de la atmósfera, cuya absorción de radiación da lugar a marcas en las fotografías ultravioleta. La fotografía fue proporcionada por Michael J. S. Belton, del Observatorio Nacional de Kitt Peak. El mapa que la acompaña muestra las posiciones de las células de convección más importantes.

Una cosa es cierta: la atmósfera de Venus responde a un equilibrio de fuerzas fundamentalmente diferente del de la atmósfera de la Tierra y Marte o, incluso, de Júpiter y Saturno. Ello se debe a la lenta rotación de Venus. En cualquier planeta, el transporte de calor hacia el polo efectuado por los vientos corresponde a un gradiente de presión atmosférica: la presión es mayor en el ecuador que en los polos. En un planeta en rotación rápida, como es el caso de la Tierra, la fuerza hacia el polo sobre una partícula en virtud del gradiente de presión queda contrarrestada por la fuerza de Coriolis, es decir, la desviación de una partícula de la atmósfera que actúa perpendicularmente a su trayectoria por hallarse sobre una esfera en rotación. (Para un observador situado a alguna distancia del planeta, quedaría claro que la desviación corresponde a la rotación de la rejilla coordenada del planeta, con latitud y longitud, bajo el viento. Para un observador en movimiento con el planeta, es el viento el que parece sufrir la desviación.) La fuerza de Coriolis sobre una partícula dada es proporcional a la velocidad de la partícula.

Puesto que Venus gira lentamente, habrá que despreciar la fuerza de Coriolis. En su lugar, según observara por primera vez Conway B. Leovy, de la

Universidad de Washington, la fuerza hacia el polo que actúa sobre una partícula de viento que gira en torno al planeta de Este a Oeste, como parte de la super-rotación global de la atmósfera, está equilibrada por la fuerza centrífuga que tiende a impulsar la partícula alejándola del eje de rotación del planeta, llevándola, por tanto, hacia el ecuador. Al depender del cuadrado de la velocidad de la partícula, la fuerza centrífuga difiere sustancialmente de la fuerza de Coriolis.

Las fotografías ultravioleta de la atmósfera de Venus revelan una gran variedad de rasgos atmosféricos que presumiblemente encontrarán su explicación de acuerdo con el desusado balance de fuerzas que allí domina. De tales características, las mayores corresponden a las configuraciones extendidas a todo el planeta que sirvieron para revelar la circulación de cuatro días hacia el Oeste. Hicimos notar la asociación de tales características con ondas planetarias. Sin duda, las ondas se propagan vertical y horizontalmente al mismo tiempo; pueden transportar, por consiguiente, cantidad de movimiento hacia arriba, e intervenir así en la alimentación de la circulación de cuatro días. A menor escala, algunas de las fotografías del Pioneer Venus han revelado trenes de ondas. En un caso, las ondas estaban representadas por bandas oscuras, de una longitud aproximada de 1000 kilómetros, separadas entre sí por unos 200 kilómetros. Las ondas se hallaban en las latitudes medias del hemisferio Sur de Venus y se disponían formando un ángulo grande con los paralelos del planeta.

En algunas de las fotografías ultravioleta se ven configuraciones poligonales, células de convección sin duda. Mientras no se identifiquen todos los absorbentes atmosféricos de la radiación ultravioleta que modulan las imágenes ultravioleta, no podrá decirse si el núcleo oscuro de cada célula es la región de ascendencia y el borde brillante de las células es la parte donde el aire está descendiendo. Podría ser que sucediera lo contrario. En cualquier caso, las células de convección se observan principalmente en la parte de atmósfera que está directamente enfrentada al Sol, o bien al Oeste (es decir, viento abajo) de esa región. La absorción de radiación solar allí basta, al parecer, para inducir convección cerca de las cimas de las nubes. Un análisis de la estabilidad de la atmósfera, basado en medidas realizadas por las sondas Pioneer Venus que penetraron en la atmósfera a primeras horas de la mañana, muestra que la capa de unos 10 kilómetros situada por debajo de las cimas de las nubes es inestable y capaz de subversión convectiva. La capa inestable debe aumentar su espesor en el curso de la mañana, de modo que, por la tarde, las crestas de las células convectivas son visibles desde encima de las nubes.

Las ondas y las células de convección constituyen dos ejemplos de movimientos fluctuantes o variaciones a corto plazo superpuestas al estado medio de la atmósfera. Tales movimientos están presentes a todas las escalas de tamaño y en todas las altitudes. Se encuentran indicaciones de ellos no sólo en las fotografías ultravioleta, sino en los registros de temperatura y velocidad del viento tomados por las sondas Pioneer Venus. La atmósfera de Venus revela, también, una sorprendente variación en escalas de tiempo, cuyo intervalo dura meses o años. Tenemos un ejemplo de la variabilidad a largo plazo en el cambio aparente de la circulación dominante hacia el Oeste. Desde que la misión Pioneer Venus penetró en la atmósfera de Venus en diciembre de 1978, la atmósfera a nivel de las nubes ha estado girando como un cuerpo sólido, pero en la época del *Mariner 10*, unos cuatro años antes, las latitudes medias giraban más deprisa que el resto. (Esto constituía el chorro mencionado antes.) Es difícil comprender cuál sea el mecanismo responsable de tal cambio, si atendemos a la constancia de la radiación solar incidente en Venus y consideramos la suave ondulación que caracteriza (según se sabe ya) la superficie del planeta.

La exploración de la atmósfera de Venus nos ha revelado los siguientes datos: una alta temperatura en la proximidad de la superficie, su super-rotación hacia el Oeste, su célula de Hadley a nivel de las nubes, sus vórtices polares, su criosfera en el hemisferio nocturno y sus polos calientes por encima de las nubes. Un proyecto conjunto de grupos rusos y franceses se propone situar un globo bastante por debajo de las nubes de Venus en 1984. Se seguirá al globo en su arrastre de Este a Oeste por el viento, cruzando la cara iluminada del planeta. Otra misión, proyectada ésta por los Estados Unidos para mediados de nuestra década, se prepara para transportar instrumentos que recojan datos en la alta atmósfera, donde todavía continúa explorando el vehículo orbital Pioneer Venus. El éxito de la investigación de la atmósfera de Venus ha superado las previsiones, y los descubrimientos que quedan por desentrañar justifican ulteriores esfuerzos.

Ciencia y sociedad

Arqueología española. 1850-1900

La arqueología, a pesar de ser una ciencia joven, tiene ya una interesante y apasionada historia y estamos obligados a escribirla antes de que se pierdan recuerdos y noticias de los que todavía, directa o indirectamente, hay gentes que pueden dar fe. Sin perjuicio de tratar del tema en otra ocasión de manera más amplia, nos limitaremos a poner de manifiesto unos cuantos hitos que jalonan la historia de la arqueología en España entre los años 1850 y 1900, a lo largo de cuyas décadas esta rama del saber ha sobrepasado la etapa de la "Anticuaria", nombre con que se designaba en el siglo pasado, para llegar a ser una verdadera ciencia con metodología y contenido propios.

En el período de un siglo, la arqueología ha pasado, de ser una parcela que apenas si era cultivada por unos cuantos aficionados y por muy escasos hombres de ciencia, a ser un campo en el que desarrolla su actividad un elevado número de investigadores sólidamente preparados, gracias a cuyo esfuerzo el horizonte histórico y cultural del mundo se ha ampliado de una manera insospechada para quienes protagonizaban su cultivo hace unos pocos lustros; pero no hay que olvidar que esta situación, altamente esperanzadora, no se ha alcanzado sin esfuerzo.

Muy esquemáticamente, voy a consignar algunas de las fechas y los hechos que considero más importantes, así como los nombres de algunas de las personas que las protagonizaron entre 1850 y 1900.

Hemos de empezar por Basilio Sebastián Castellanos, fundador de la Academia Anticuaria Española y luego de la Academia Española de Arqueología y Geografía, entidades que, aunque de vida efímera, sirvieron para aglutinar y animar a quienes sentían análogos afanes. Fue Castellanos el primer profesor de arqueología en España y autor de un *Compendio elemental de Arqueología*, que, a pesar de los errores que en él se dan, reflejo del nivel científico que por entonces había en España en el campo que nos ocupa, fue fuente de información para los estudiosos del momento. Su polifacética formación le llevó también a ser Director del Museo Arqueológico Nacional, cargo desde el que impulsó los estudios arqueológicos.

Casiano del Prado, en 1848, había reconocido la importancia de los hallazgos de útiles paleolíticos en las terrazas del Manzanares y los había clasificado adecuadamente. Marcelino de Sautuola, en 1875, reconocía la "Cueva de Altamira", cuyas pinturas descubriera su hija en 1879, y tuvo el mérito singular de que, de inmediato, se percató de la importancia de aquel descubrimiento con el que alumbraba al mundo el arte rupestre paleolítico, y en sus *Breves apuntes sobre algunos objetos prehistóricos de la provincia de Santander*, aparecido en 1880, publicó por vez primeras el plafón principal de Altamira y clasificó acertadamente sus pinturas. Este descubrimiento produjo tal sorpresa en los medios científicos de España y de fuera que no sólo fue acogido con escepticismo, sino que las más burdas calumnias se cernieron sobre él hasta el extremo de ser totalmente silenciado en congresos científicos internacionales.

En favor de los puntos de vista de Sautuola, únicamente se levantó la voz de Juan Vilanova y Piera, catedrático de la Universidad de Madrid, quien, frente a la postura adoptada por los más prestigiosos investigadores españoles y extranjeros, se erigió en paladín de la tesis de Sautuola. Tesis que, tras fuerte resistencia, y gracias a hallazgos semejantes que por entonces se produjeron en Francia, acabó por imponerse y recibió el definitivo espaldarazo científico cuando Cartailhac, pontífice de la prehistoria en Francia y tenaz contradictor de la tesis de Sautuola, acabó reconociendo noblemente su error en su famoso trabajo *Mea culpa d'un sceptique*, publicado en el año 1902, sin que Sautuola, muerto en 1888, alcanzara la satisfacción de conocer el arrepentimiento de su más importante y tenaz adversario científico. Algunos años después, el conde de Vega del Sella descubriría y clasificaría adecuadamente importantes yacimientos del Paleolítico, utilizando en el estudio de los mismos la más rigurosa metodología.

Mientras tanto, llegaban al S.E. peninsular los hermanos Enrique y Luis Siret, cuyos trabajos fueron especialmente decisivos para el conocimiento y adecuada valoración de las culturas de la Edad de los Metales: Los Millares, Almizaraque, El Oficio, Tres Cabezos, La Pernera, el Argar, etcétera, figuran entre sus principales aportaciones.

En 1894 se clasifica y valora, por Vilanova y Rada y Delgado, la "Cerámica de Ciempozuelos", cuya expansión europea pronto quedaría confirmada; por su parte, Góngora, en sus *Antigüedades Prehistóricas de Andalucía*, daba puntual relación acerca del hallazgo de la cueva de los Murciélagos, que había tenido lugar en Albuñol (Granada) en 1831, en la que entre otras piezas se encontró una diadema de oro cuyo ingreso en el Museo Arqueológico de Granada tuvimos ocasión de gestionar cerca de los Padres Jesuitas de Granada que la conservaban en su poder.

La "cultura del Algar", con sus típicos enterramientos en tinajas o en cistas, se perfila con caracteres bien definidos en la estación epónima excavada por Siret y en otros yacimientos del S.E., entre los que hay que mencionar la necrópolis de San Antón de Orihuela (Alicante), que excavó Santiago Moreno en 1872 y el P. Furgús posteriormente.

En 1887 tuvo lugar el descubrimiento del sarcófago antropoide de Cádiz, con cuyo hallazgo la arqueología fenicia en España quedaba representada por una pieza de especial significación.

De épocas más avanzadas, se descubren las esculturas del Cerro de los Santos y del Llano de la Consolación en Montealegre (Albacete) entre 1859 y 1900, con lo que se abre un nuevo capítulo para la historia de nuestra escultura antigua. Se descubre, también, el busto de la "Dama de Elche", y al evocarlo no pueden dejar de acudir a nuestro recuerdo los nombres de Manuel Campello Escaple, a quien en 1965, octogenario ya, se le distinguió con la Cruz de Alfonso X el Sabio, por haber sido el descubridor material de la Dama, Manuel Campello Antón, a cuya posesión pasó por ser propietario del terreno donde se encontró, a Pierre Paris, quien llevó a cabo su compra y la trasladó al Museo del Louvre, a Pedro Ibarra, quien defendió y gestionó la compra de la Dama por el Estado, sin que por desgracia sus gestiones se vieran correspondidas.

A pesar de su intervención en la compra y exilio de la Dama, el nombre de P. Paris hay que pronunciarlo con respeto, pues a él se debe el primer intento de sistematización de la Cultura Ibérica, y concretamente de su cerámica, de la que tanto se escribiría después poniéndose de manifiesto los errores en que P. Paris había incurrido al emparentarla con las cosas micénicas.

Por su parte, G. Bonsor –el pintor inglés captado por la arqueología de España– exploraría las márgenes del Guadalquivir y especialmente los alrededores de Mairena y de Carmona, alumbrando una serie de yacimientos

cuyo estudio supuso importantísimas aportaciones para nuestra arqueología romana y prerromana.

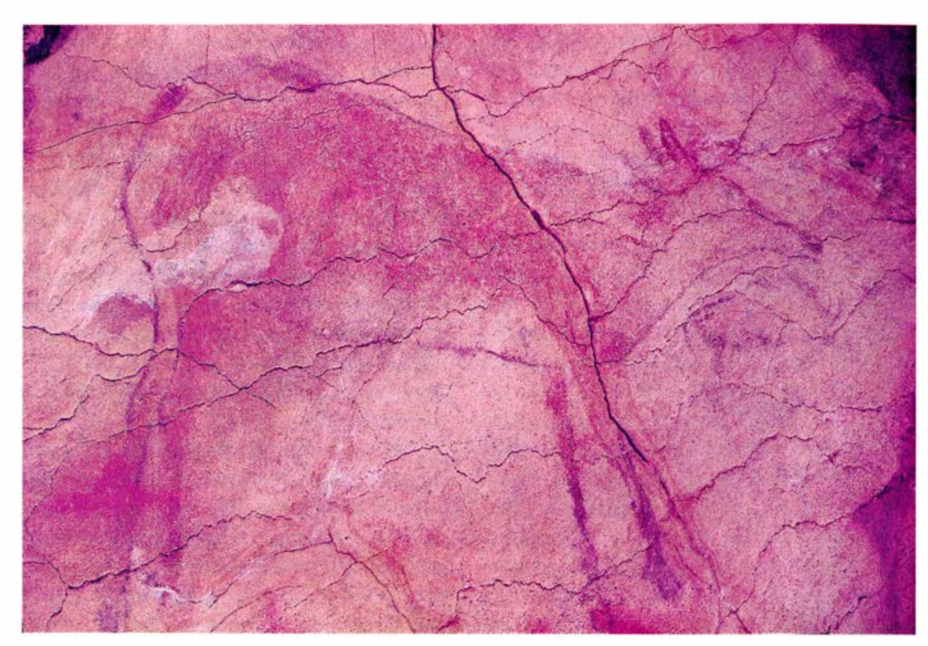
En 1881, Saavedra ratificaría noticias que ya habían consignado los historiadores del siglo XVI en relación con la ubicación de Numancia, sobre cuyo emplazamiento no quedaría ninguna duda tras las excavaciones llevadas a cabo en 1877 por Rada y Delgado, Olózaga y Fernández Guerra, a pesar de lo cual no ha faltado un sabio extranjero que, con notorio desenfado, se ha asignado el honor de haber descubierto los vestigios de la inmortal ciudad.

Rodríguez de Berlanga estudiaría los Bronces que contienen las "Leyes de Málaga y Salpensa", encontradas casualmente en 1851, y cuyos textos son fundamentales para el estudio y conocimiento del régimen municipal romano. El estudio que de estos textos hizo Rodríguez Berlanga, modélico para su época, sirvió además para llamar la atención hacia ellos de Mommsen y de Hübner; este último quedaría definitivamente vinculado a nuestra ciencia y, fruto de la dedicación, fue la publicación del *Corpus Inscriptionum Latinarum* y de los *Monumenta Linguae Ibericae* y de *La Arqueología de España*, obras todas llenas de erudición cuya vigencia todavía conservan.

Al hallazgo de los Bronces de Málaga siguieron los de Osuna, Bonanza y otros más que enriquecieron el Museo Loringiano y dieron lugar a doctas monografías que contribuyeron a llamar la atención de los estudiosos hacia la arqueología hispano-romana, en uno de cuyos yacimientos más señeros –Itálica– Demetrio de los Ríos hizo excavaciones que luego continuaría Hungtinton en 1898 para acrecentar las colecciones de la Hispanic Society por él fundada en Nueva York.

El descubrimiento, también casual, del Tesoro de Guarrazar, acaecido en 1859, sería un poderoso acicate para el estudio de las artes aplicadas españolas. La venta al extranjero de parte del mismo, a la que luego se sumaría la de la Dama de Elche, sirvieron para espolear el interés por la defensa de nuestro patrimonio cultural. Se vieron aquellas en parte reparadas cuando estas piezas retornaron a España en virtud de un convenio con el Gobierno Francés el año 1941.

La creación del Museo Arqueológico Nacional, en 1867, cuya inauguración tendría lugar en 1871, el funcionamiento de varios museos arqueológicos provinciales puestos bajo la custodia del cuerpo facultativo de archiveros bibliotecarios y arqueólogos, creado en 1858, o bajo la tutela de las comisiones provinciales de monumentos, y la actuación de varias sociedades arqueológicas que con carácter provincial o local se crearon entonces, supuso el disponer de una serie de instituciones en las cuales se recogían y exponían los testimonios más insignes de nuestras pasadas culturas.



Marcelino de Sautuola reconocía, en 1875, la Cueva de Altamira, cuyas pinturas descubriría en 1879 su hija

Paralelamente, se hicieron algunos intentos de sistematizar nuestra arqueología, con diferente fortuna, pero que en cualquier caso son exponente del nivel que alcanzó nuestra ciencia entre 1850 y 1900, que si no fue muy elevado en su conjunto, tuvo, sin embargo, singulares aciertos. Y sobre todo sirvió para que por desinterés no se perdieran algunos importantes hallazgos que tuvieron lugar en aquellas décadas, entre los que se cuentan "La bicha de Balazote", el "brazalete" de oro de Estremoz, o de Bauer, encontrado en 1872, o los "toros de Coxtig" (Mallorca), enigmático conjunto de cabezas y astas de toro, de bronce, que se encontraron casualmente en 1895.

Con estas aportaciones y hallazgos alcanzamos el alborear del siglo XX, en cuyos primeros lustros asistiremos al logro de nuevas e importantes conquistas, las cuales, como había sucedido en la etapa anterior, van a contribuir a que se perfilen con trazo firme nuestros estudios. De eslabones entre una y otra etapa sirven nombres tan prestigiosos como el Marqués de Cerralbo, P. Fita, Alcalde del Río, Manuel Gómez-Moreno, Mélida, Obermaier, Breuil, Cabre, Schulten... etc., la reseña de cuya labor ingente, rigurosa y eficaz, será objeto de ulterior tratamiento.

Fueron ellos auténticos pioneros y paladines de una ciencia que, si empezó balbuceante, contradictoria y un poco empíricamente, pronto, gracias al esfuerzo y al tesón de sus cultivadores, comenzó a perfilarse como una rama de la historia con método y contenido propios y con unos resultados científicos evidentes pese a las vacilaciones, tanteos y hasta limitaciones que todavía se echan a ver en algunas de las parcelas que cultiva, pero sobre las cuales se proyecta cada día mayor claridad, lo que explica el enorme atractivo que la arqueología ha despertado a todos los niveles. (Gratiniano Nieto Gallo.)

Investigando los sistemas de afloramiento

Entre los días 2 de marzo y 17 de abril de este año, se llevó a cabo, frente a las costas de California, la campaña oceanográfica OPUS I, la primera de un nuevo programa de estudio de los fenómenos de afloramiento (designado en inglés con las siglas OPUS, de "Organization of Persistent Upwelling Structures"). En este programa, coordinado por R. C. Dugdale, de la Universidad de Southern California, participan científicos de diversos laboratorios y universidades de Estados Unidos y del Instituto de Investigaciones Pesqueras de Barcelona (España).

Se denomina afloramiento al ascenso de aguas relativamente profundas hasta la zona superficial del mar ("Las áreas oceánicas más productivas", de Ramón Margalef y M. Estrada; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1980). Este fenómeno, que ocurre principalmente en la costa oeste de los continentes y en las

zonas marinas ecuatoriales, reviste especial importancia porque el agua profunda es rica en nitratos, fosfatos y otras sales nutritivas necesarias para el crecimiento del fitoplancton, que las consume en la capa superior, iluminada, de la columna de agua.

Aunque las causas del afloramiento sean complejas, los factores principales se resumen en la distribución de corrientes y el arrastre del agua superficial mar afuera causado por vientos de dirección adecuada. El afloramiento no ocurre de modo homogéneo a lo largo de la costa. Podemos imaginarnos un sistema de afloramiento como compuesto por una serie de centros de afloramiento intenso (plumas), separados por áreas donde el movimiento ascendente del agua es más débil. Las plumas suelen ocupar una posición persistente, aunque su extensión y la velocidad de ascenso del agua pueden presentar fluctuaciones en respuesta a ciertas variables, intensidad de los vientos locales por ejemplo.

El programa OPUS está dedicado a un estudio detallado de las plumas de afloramiento; varios subprogramas o componentes se ocupan de diferentes aspectos físicos, químicos y biológicos del problema. Por ejemplo, el componente dedicado al estudio del fitoplancton se propone la definición de los motivos de distribución de fitoplancton y sales nutritivas en un centro de afloramiento, la investigación del papel de los mecanismos físicos y biológicos en la producción de estas distribuciones y la evaluación de la importancia de las plumas en relación con la composición y distribución del fitoplancton en el conjunto de la región de afloramiento.

La campaña OPUS I tuvo sobre todo un carácter piloto; su finalidad principal era explorar la zona de trabajo, hacer una identificación preliminar de las escalas más importantes de variabilidad del sistema estudiado y optimizar de acuerdo con ellas la estrategia de muestreo. Durante la campaña, se realizaron dos tipos de trabajo: secciones hidrográficas, en que se ocupaban una serie de estaciones situadas en una línea perpendicular a la costa, y recorridos, en que se barría sistemáticamente el área de estudio, con objeto de hacer mapas de la distribución superficial de diversos parámetros. Durante parte de la campaña, se contó además con el apoyo de un avión que sobrevolaba la zona y mediante sensores remotos elaboraba mapas de temperatura superficial del agua y concentración de clorofila. En las estaciones hidrográficas se tomaba agua de diversas profundidades y se hacían determinaciones de salinidad, oxígeno, sales nutritivas y clorofila; además, se tomaban muestras para el análisis de las poblaciones de fito y zooplancton y se realizaban perfiles verticales continuos de temperatura y salinidad con una sonda CTD y de fluorescencia (parámetro que proporciona una estimación de la concentración de clorofila) con un fluorómetro especial. Durante los transectos se aspiraba agua de superficie con una bomba y se registraban en continuo temperatura, concentración de varias sales nutritivas y fluorescencia.

Las secciones hidrográficas pusieron de manifiesto los gradientes perpendiculares a la costa, típicos de una zona de afloramiento: concentraciones de sales nutritivas elevadas cerca de la costa y decrecientes al alejarse de ella y bajas concentraciones de clorofila en la zona costera con tendencia a aumentar hacia los bordes de la pluma. Durante la última fase de la campaña, se llegaron a detectar concentraciones de clorofila de 25 miligramos por metro cúbico (como referencia, se puede indicar que los valores usuales en el Mediterráneo, en época de estratificación y en zonas no afectadas por vertidos de aguas residuales, no suelen llegar a 0,5 miligramos por metro cúbico). Dentro de las líneas generales mencionadas, los mapas pusieron de manifiesto una gran heterogeneidad espacial de los parámetros físico-químicos y biológicos.

La elaboración e integración de los datos acumulados durante una campaña oceanográfica es un proceso laborioso que ocupa a los científicos participantes en el proyecto un tiempo mucho más largo que el necesario para realizar las mediciones a bordo. En el caso de OPUS I, aún es pronto para aventurar conclusiones, pero todo hace suponer que los resultados obtenidos representarán una aportación importante en el estudio de la estructura y función de los sistemas de afloramiento. (Marta Estrada.)

El cuerpo negro browniano

En 1905, Albert Einstein publicó tres artículos fundamentales: sobre el movimiento browniano, el efecto fotoeléctrico y la teoría especial de la relatividad. En otro escrito clásico, publicado doce años más tarde, analizó la interacción mecánico-cuántica de la radiación electromagnética con las moléculas de un gas. Ese escrito, de 1917, estableció el concepto de cuanto de energía electromagnética (más tarde denominado fotón), dotado de una energía y un momento determinados. Para analizar los efectos de la radiación sobre las moléculas del gas, Einstein se apoyó en sus conclusiones sobre el movimiento browniano y el efecto fotoeléctrico. Pero es curioso constatar que no tomó en consideración su trabajo sobre relatividad especial, ya que sólo consideró el caso en que las moléculas del gas se mueven a velocidades no relativistas, es decir, pequeñas en comparación con la velocidad de la luz. Nadie cayó en la cuenta de tal omisión hasta 1979, cuando Timothy H. Boyer, de la Universidad de Nueva York, la puso sobre el tapete. Además, argüía que si Einstein hubiese partido de las hipótesis relativistas correctas, entonces su análisis le hubiera llevado a una inquietante incoherencia entre la mecánica cuántica y la mecánica estadística.

El escrito de Einstein de 1917 era la culminación de los primeros años de la mecánica cuántica, iniciada cuando Max Planck analizó el intercambio de energía entre la pared de una cavidad de un cuerpo sólido y la radiación contenida en dicha cavidad. La pared de una tal cavidad es el mejor emisor de todas las longitudes de onda de la radiación electromagnética. La gráfica de la intensidad de la radiación respecto de la longitud de onda coincide con la correspondiente gráfica para un cuerpo negro perfecto; esta gráfica se llama el espectro del cuerpo negro. La forma del espectro del cuerpo negro depende de la temperatura de la pared de la cavidad; se trata, pues, de una familia de gráficas, una para cada temperatura. La determinación de un procedimiento general para deducir la familia de gráficas a partir de bases teóricas era uno de los problemas más acuciantes de la física de las postrimerías del siglo pasado y principios de éste. En octubre de 1900, Planck anunció que había desarrollado una única fórmula, coherente con los datos observados.

Planck procedió al análisis de la interacción de la radiación con la pared de la cavidad. Supuso que la pared estaba formada por resonadores submicroscópicos tales, que cada uno de ellos oscilaba a una frecuencia característica y que emitía y absorbía radiación en dicha frecuencia. La distribución de energía entre los resonadores de la pared viene descrita por la fórmula de mecánica estadística llamada distribución de Boltzmann.

A fin de que los resonadores pudieran estar en equilibrio térmico con la radiación, Planck se vio obligado a concluir que los resonadores podían emitir y absorber energía sólo en cantidades múltiplos enteros de $\hbar\nu$, siendo ν la frecuencia del resonador y $\hbar$ una constante universal, que ahora se conoce como

la constante de Planck. Sin embargo, Planck limitó cautamente sus consideraciones sobre la cuantización de la energía a los intercambios entre los resonadores materiales y el campo de radiación, sin sacar conclusiones sobre la energía de la radiación propiamente dicha. En 1905, Einstein propuso que la radiación actuaba como si estuviese constituida por un número finito de cuantos de energía localizados de valor $\hbar\nu$. Durante los doce años subsiguientes, Einstein extendió su teoría corpuscular, argumentando que la luz no sólo se comportaba como si estuviese constituida por partículas, sino que de hecho lo estaba.

En su escrito de 1917, Einstein detalló la interacción cuántica entre material y radiación. Con él la mecánica cuántica había completado un círculo: Planck había empezado con la ley de radiación del cuerpo negro y había deducido la distribución de Boltzmann de la energía para osciladores materiales, mientras que Einstein, por contra, dedujo la ley de radiación de Planck a partir de la distribución de Boltzmann. Einstein consideró un gas formado por moléculas hipotéticas en estado de equilibrio término con la radiación del cuerpo negro. Se supone que para cada molécula sólo son posibles dos niveles de energía. Una molécula en el nivel inferior de energía puede absorber radiación cuya frecuencia, multiplicada por la constante de Planck, sea igual a la diferencia de energía entre los dos niveles. Análogamente, una molécula en el nivel superior puede caer espontáneamente al nivel inferior emitiendo radiación de la misma frecuencia.

Einstein supuso que las moléculas están sometidas a un movimiento browniano, como las partículas suspendidas en un medio líquido. Cada molécula se mueve en línea recta hasta que su trayectoria se ve alterada por una colisión. Los intervalos entre dos choques son aleatorios y por ende la partícula recorre un camino en zigzag. En sus cálculos no relativistas, Einstein consideró que las moléculas presentaban una velocidad pequeña y una masa grande en comparación con el equivalente másico de la energía de radiación. En consecuencia, la velocidad de una molécula apenas cambia por el efecto de la emisión o absorción de un fotón.

El análisis de Boyer de estas ideas, que apareció en el *Physical Review*, sugería que la descripción de Einstein no podría ser extendida a velocidades moleculares relativistas. Boyer argumentaba que, bajo supuestos relativistas, la distribución de Boltzmann de la energía de las moléculas no podía reconciliarse con la distribución de la energía de la radiación dada por la ley de radiación de Planck. Puesto que la teoría especial de la relatividad debe ser válida dentro de toda teoría física, el hallazgo de Boyer implicaría una grave incoherencia entre una ley de la mecánica estadística y una ley de la mecánica cuántica. La ley de radiación de Planck depende de la temperatura de los resonadores oscilantes, pero es independiente de cualquier otra propiedad, como por ejemplo la masa. Boyer concluyó que la distribución de Boltzmann de la energía de partículas relativistas podría ser coherente sólo con una ley de radiación que dependiera de la masa de las partículas.

Otros tres análisis, con resultados bastante distintos, han aparecido ahora en el *Physical Review*. Sus autores son Uri Ben-Ya'acov, de la Universidad de California en Santa Bárbara, Asher Peres, del Instituto de Tecnología Technion-Israel, y Charles H. Braden, Ronald F. Fox y Harold A. Gersch, del Instituto de Tecnología de Georgia. Estos investigadores señalan que ciertas precauciones son necesarias en el proceso de extender el análisis de Einstein a partículas rápidas. Por ejemplo, Boyer adoptó la suposición de Einstein de que una molécula se mueve inercialmente, o sin aceleración, en la emisión o absorción de un fotón, que funciona bien para las velocidades pequeñas investigadas por Einstein. Sin embargo, si las velocidades son grandes, la sacudida que la molécula experimenta como resultado de la emisión o absorción de un fotón no se puede despreciar, ni siquiera cuando la energía intercambiada en el sistema de referencia de la partícula es pequeña en comparación con la masa de la molécula. En otras palabras, el modelo de Boyer viola el principio de conservación del momento. También viola el principio de conservación de la energía, y no tiene en cuenta el hecho de que la masa de una partícula cambia como resultado de la emisión o absorción de la energía de un fotón.

De acuerdo con las tres interpretaciones recientes, no se halla ninguna incoherencia entre la teoría especial de la relatividad, la mecánica cuántica y la mecánica estadística cuando se parte de suposiciones relativistas apropiadas. De hecho, tanto a altas como a bajas velocidades, la distribución de Boltzmann de la energía de las moléculas de un gas implica la ley de radiación de Planck. Aunque la conclusión de Einstein es válida para velocidades relativistas, podemos preguntarnos por qué no investigó él tales velocidades.

ERRATA

En el número 58, correspondiente al mes de julio de este año, en los recuadros de las páginas 114 y 116 deben corregirse las siguientes fórmulas: en el apartado «Relatividad general», la fórmula (1) se leerá

$$ds^2 = g_{\mu\nu}\, dx^\mu\, dx^\nu \qquad (1)$$

En el apartado «Ecuaciones de los modelos cosmológicos ortodoxos», la fórmula (1) se leerá

$$ds^2 = c^2dt^2 - R^2(t)\left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2\,(d\theta^2 + sen^2\theta\, d\varnothing^2\right] \qquad (1)$$

la fórmula (4),

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{R_0}{R_1} - 1 \qquad (4)$$

y la segunda ecuación de Einstein,

$$\frac{8}{3}\pi\rho = \frac{k}{R^2} + \frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{\Lambda}{3}$$

En el apartado «Parámetros cosmológicos» la fórmula (5) se leerá

$$q_0 = \frac{\ddot{R}_0\, R_0}{\dot{R}_0^2} \qquad (5)$$

y la (10)

$$T = \int_0^1 \frac{dy}{\sqrt{\left(\frac{\Omega}{2} - q\right)y^2 + \Omega y^{-1} + q + 1 - \frac{3}{2}\,\Omega}} \qquad (10)$$

Ingeniería genética en células de mamífero

Uno de los objetivos de las técnicas de ADN recombinante es la curación de enfermedades congénitas. Un paso dado en ese sentido es la corrección de un defecto hereditario por microinyección de un gen en una célula de mamífero

W. French Anderson y Elaine G. Diacumakos

Se conocen más de 2000 enfermedades genéticas en el hombre: enfermedades causadas por la herencia de un gen defectuoso que determina la síntesis de una proteína defectuosa. Algunas pueden recibir tratamiento, pero ninguna curarse. La sanación llegaría si se corrigiera el error en la estructura de ADN responsable de la enfermedad, o por transferencia de un gen funcional normal a las células defectuosas. Las técnicas de ingeniería genética permiten aislar un gen en la dotación total de ADN de un organismo, "recombinarlo" con una molécula de ADN transportadora e introducir el ADN recombinante en una célula bacteriana. Desde el primer momento ha estado claro que si la ingeniería genética pudiera extenderse a las células de mamíferos una de las aplicaciones más atractivas sería, algún día, la terapia de genes en pacientes humanos.

Los lectores de esta revista están familiarizados con las técnicas de ADN recombinante utilizadas para la clonación molecular de ADN extraño en bacterias. El ADN, o material genético, es una larga y fina doble hélice, cada una de cuyas cadenas está compuesta por subunidades llamadas nucleótidos. Cada nucleótido posee uno de los cuatro grupos químicos llamados bases, la secuencia de las cuales cifra la información genética. Un gen es un segmento de ADN con información cifrada que se transcribe a ARN mensajero y posteriormente se traduce a proteína. En la clonación molecular, el ADN que se va a clonar se inserta en una molécula vectora, generalmente un plásmido (un pequeño segmento circular de ADN bacteriano) que lleva un gen que determina resistencia a algún antibiótico. Los plásmidos recombinantes se incuban con células bacterianas previamente tratadas para hacerlas permeables. Algunas de las células incorporan el plásmido; estas células "transformadas" pueden ser seleccionadas por el investigador, ya que crecen en presencia del antibiótico. Las células transformadas que llevan el fragmento de ADN deseado pueden seleccionarse de varias maneras diferentes. Pueden cultivarse en grandes cantidades, bien para producir la proteína determinada por el fragmento seleccionado [véase "Proteínas útiles obtenidas a partir de bacterias recombinantes", por Walter Gilbert y Lydia Villa-Komaroff; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio, 1980], o para estudiar la estructura y expresión de dicho fragmento [véase "Genes fragmentados", por Pierre Chambon; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio, 1981].

La ingeniería genética de células de mamífero es más compleja. Hay que encontrar la forma de introducir el gen deseado, purificado y multiplicado por clonación en bacterias, en una célula de mamífero. Además, es necesario que el gen se exprese: que el ADN se transcriba a ARN mensajero y éste se traduzca a proteína. Se han desarrollado técnicas para insertar un gen en una célula de mamífero. Al menos en un caso se ha conseguido la expresión normal del gen. Describiremos aquí estos resultados y señalaremos las dificultades, relativas a la expresión de los genes clonados en células de mamífero, que han de salvarse antes de que la terapia de genes sea factible en pacientes humanos.

Transferencia de genes

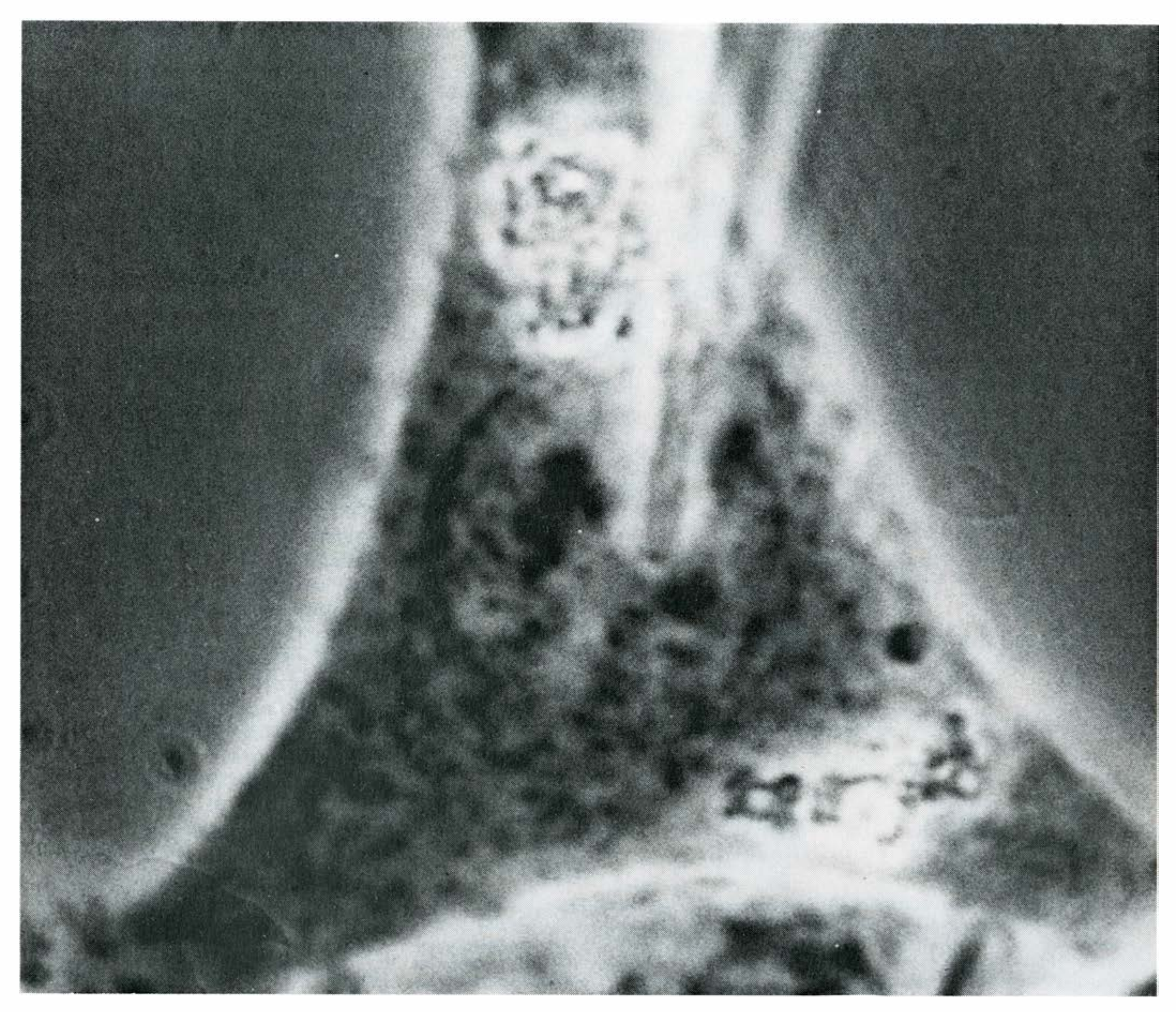
Hay un método para transferir genes de una célula a otra, desarrollado antes de que fuese posible utilizar la tecnología del ADN recombinante: la hibridación de células somáticas, o fusión de dos células no germinales. Se incuban dos líneas celulares con un agente, como el virus Sendai inactivado o el polietilenglicol, que favorece la fusión entre células de las dos líneas. Al principio, una célula fusionada posee dos núcleos, cada uno de los cuales contiene los cromosomas de una de las células parentales; en el proceso de la división celular, la membrana nuclear se desintegra y se forma un nuevo y único núcleo que contiene los cromosomas de las dos células parentales, y que expresa algunos genes de ambos parentales. Estas células híbridas se aíslan, incubándolas en un medio "selectivo", donde sólo ellas sobreviven.

El estudio de las células híbridas permite asociar características particulares con cromosomas específicos, y localizar así genes en los cromosomas. Además, ofrece información sobre cómo está regulada la expresión génica en mamíferos. Cuando una célula híbrida se divide, a menudo pierde cromosomas de una de las células parentales, si no de ambas. Algunas veces, se expresa un gen que había estado reprimido durante cierto número de generaciones, indicando así que la célula ha perdido un cromosoma que llevaba un regulador negativo del gen en cuestión. Otras veces, un gen que normalmente no se expresa en una célula parental especializada sí lo hace en el híbrido. Por ejemplo, los genes para las cadenas (de aminoácidos) de las hemoglobinas alfa y beta, que no se expresan en fibroblastos (células del tejido conectivo), sí lo hacen cuando un fibroblasto se fusiona con una célula eritroide (célula que fabrica hemoglobina, o alguna de sus precursoras); aparentemente, algún factor regulador presente en las células eritroides activa los genes de la globina (cadena de proteína de la hemoglobina) en el cromosoma de los fibroblastos.

La fusión celular sigue siendo un pro-

cedimiento eficaz para estudiar la expresión génica, pero se necesitan otros métodos para sacar partido de las técnicas de ADN recombinante y poder así insertar en células de mamífero un determinado fragmento de ADN que lleve un solo gen. Se han desarrollado dos métodos para transferir genes individuales a poblaciones de células. En uno de ellos se inserta el gen en el ADN de un virus animal y se utiliza éste para infectar las células deseadas. Por ejemplo, el gen de la globina beta de conejo se ha insertado en el ADN de SV40 (un virus de mono). Si se infecta una línea célular de mono con este virus recombinante, se expresa el gen: se fabrica el ARN mensajero y la proteína que determina. El gen de la globina beta humana es de particular interés, ya que algunas mutaciones en dicho gen son responsables de la anemia falciforme y de la talasemia beta, dos alteraciones hereditarias de las células sanguíneas que afectan a millares de personas en todo el mundo.

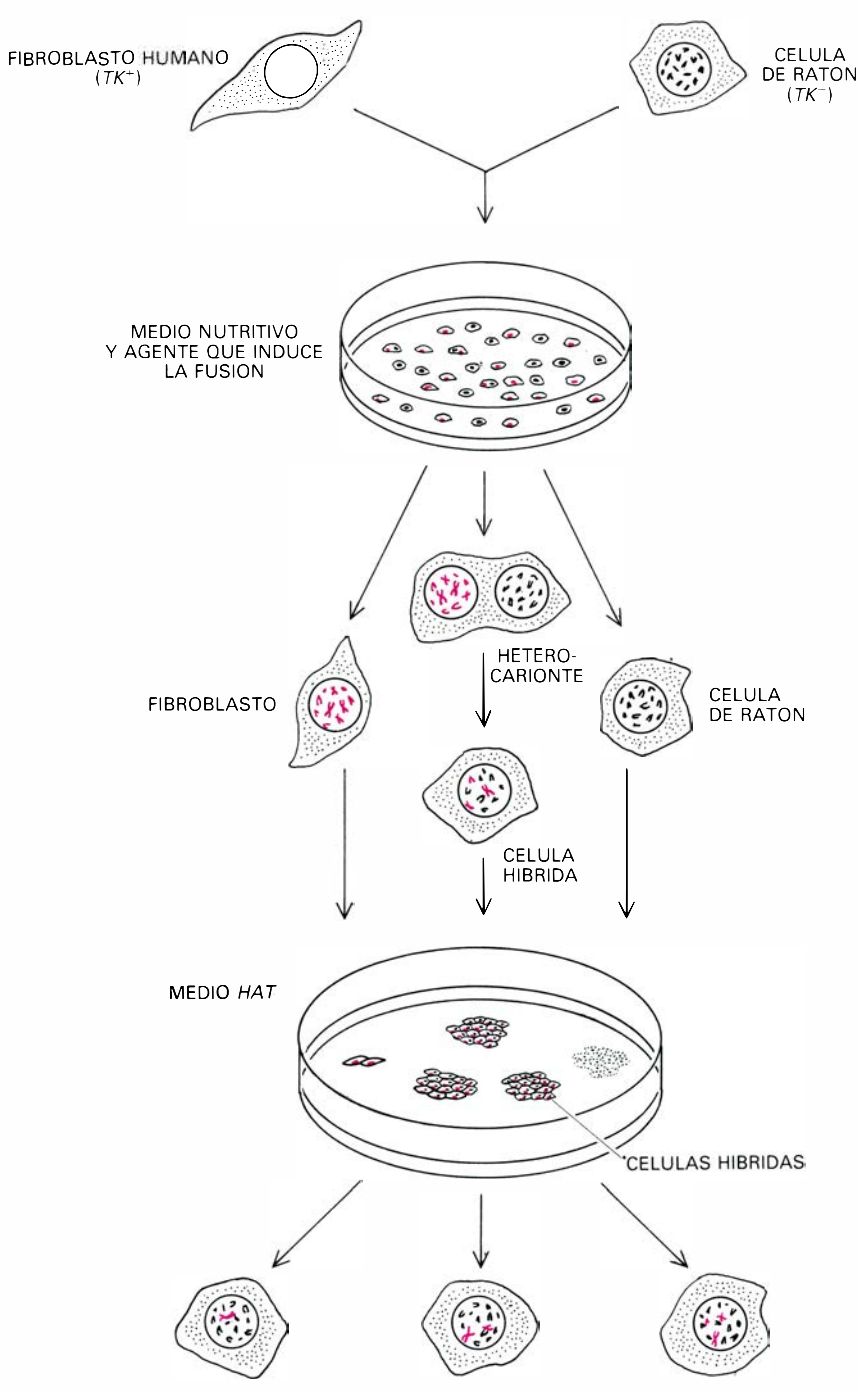
El otro método es la transferencia de genes mediada por ADN. Un fragmento de ADN purificado que lleva el gen deseado se mezcla con un ADN "transportador", y se precipita todo con fosfato cálcico. Se incuban las células con este precipitado; algunas incorporan el gen deseado (se transforman). Utilizando este método, Richard Axel, Angel Pellicer, Saul J. Silverstein y Michael Wigler, a la sazón en la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, corrigieron un defecto genético en células de ratón. Utilizaron un fragmento de ADN purificado (del virus herpes simple) que portaba el gen que determina el enzima timidina quinasa (*TK*). En un cultivo de células *L* de ratón que no tenían el gen *TK* (eran TK^-) precipitaron una pequeña cantidad del ADN purificado, mezclado con varios miligramos de ADN de esperma de salmón, como transportador. Aproximadamente una célula *L* de cada millón incorporó el gen *TK*; estos transformantes crecían y se dividían normalmente en un medio selectivo en el que las células TK^- no podían hacerlo. En efecto, estas células habían sido "curadas" de su defecto genético. Se puede transferir prácticamente cual-



CELULA DE MAMIFERO en el momento de la microinyección con ADN; la fotomicrografía de contraste de fase, realizada por uno de los autores (Diacumakos), ha sido aumentada 8500 veces. La célula, en este caso un fibroblasto de ratón, pende de un cubreobjetos de cristal. La micropipeta entra desde arriba; su extremo está en el núcleo. El diámetro externo de la pipeta es de un micrometro (milésima de milímetro); el diámetro interno mide 0,5 micrometros. La pipeta se llena de una solución salina tamponada que contiene el plásmido recombinante portador del gen que se desea transferir a la célula. La cantidad de solución que se inyecta en el núcleo se calcula de forma que contenga (por término medio) una sola copia del gen. La célula microinyectada parece recuperarse del proceso inmediatamente. Cuando la célula se coloca en un medio apropiado, se divide hasta dar lugar a una colonia.

quier gen de interés, mezclándolo o uniéndolo al gen *TK* o a cualquier otro gen que confiera una ventaja selectiva a las células transformadas.

Para obtener unas pocas células que hayan incorporado de forma estable el gen deseado, es preciso incubar el ADN con una gran población de células, tanto si se utiliza la técnica del virus recombinante como la de transferencia de genes mediada por ADN. Uno de nosotros (Anderson) pensó que valdría la pena desarrollar un procedimiento con el que poder insertar una sola copia de un gen específico directamente en el núcleo de una célula, que podría entonces multiplicarse y formar un clon de células idénticas, cada una de las cuales llevaría el gen insertado.



HIBRIDACION DE CELULAS SOMATICAS: una técnica que permite transferir genes de una célula a otra. Se fusionan células de dos tipos mezclándolas en presencia de un agente que induce la fusión, como el virus Sendai inactivado o el polietilenglicol. De la fusión de las dos células resulta un heterocarionte, que tiene dos núcleos (con los cromosomas) y una mezcla de citoplasmas. Después de la división celular se forma un núcleo nuevo y único con los cromosomas de las células parentales. Se seleccionan las células fusionadas incubándolas en un medio selectivo, *HAT*, donde sólo ellas sobreviven y se multiplican. Aquí, las células de ratón que no portan el gen de la timidina quinasa (*TK*) mueren y los fibroblastos humanos se dividen lentamente. En la división celular se pierden algunos cromosomas; en los híbridos hombre-ratón, son los cromosomas humanos los que se pierden. El estudio de células híbridas permite asociar características particulares (y, por tanto, sus genes) con cromosomas específicos, o saber cómo se expresan los genes (cómo se transcriben a ARN mensajero, y éste se traduce a proteína) en un ambiente extraño.

Microinyección

Este procedimiento podría comenzar inyectando, con una micropipeta, el gen deseado dentro de un núcleo celular. J. B. Gurdon, que trabajaba entonces en la Universidad de Oxford, y otros habían puesto de manifiesto el gran poder resolutivo de sus métodos microinyectando núcleos enteros, genes purificados o ARN mensajeros específicos en huevos enucleados (desprovistos de núcleo) de rana o en ovocitos, óvulos inmaduros. Un ovocito de rana tiene un milímetro de diámetro, aproximadamente; su volumen es 100.000 veces mayor que el de una célula somática de mamífero. Se requieren, por tanto, técnicas muy diferentes para microinyectar en el núcleo de una célula de mamífero.

Las técnicas necesarias habían sido ya desarrolladas por uno de nosotros (Diacumakos) en 1970. El examen cuidadoso de células microinyectadas con ADN revelaba que éstas se recuperaban rápidamente después de la inyección, y posteriormente crecían y se dividían con normalidad. Unos años más tarde, cuando se podía ya aislar y clonar genes específicos, decidimos colaborar en un mismo empeño: microinyectar determinados genes en células individuales de mamífero. Adolph Graessman, de la Universidad Libre de Berlín, ha desarrollado un método similar; su procedimiento resulta particularmente eficaz a la hora de analizar los productos génicos de múltiples células inyectadas, ya que es más rápido (aunque menos preciso) que el nuestro.

Decidimos transferir una copia de un gen *TK* y otra de un gen de la globina beta a una célula *L* TK^- de ratón (que no sintetizaba hemoglobina), ver si podía corregirse genéticamente la falta de timidina quinasa en las células y si el gen de la globina podía replicarse y expresarse. Elegimos esta combinación porque sabíamos que el gen *TK* había sido ya transferido a células TK^- con la técnica de transferencia de genes mediada por ADN, y que con el gen *TK* podían cotransferirse otros fragmentos de ADN. Cabía esperar un éxito razonable si preparábamos una solución en la que tanto el gen *TK* como el de la globina estuviesen a una concentración de una molécula por 10^{-11} mililitros de tal solución en cada núcleo. (En realidad, una determinada dosis de inyec-

ción contendría desde ninguna hasta varias moléculas de ADN.)

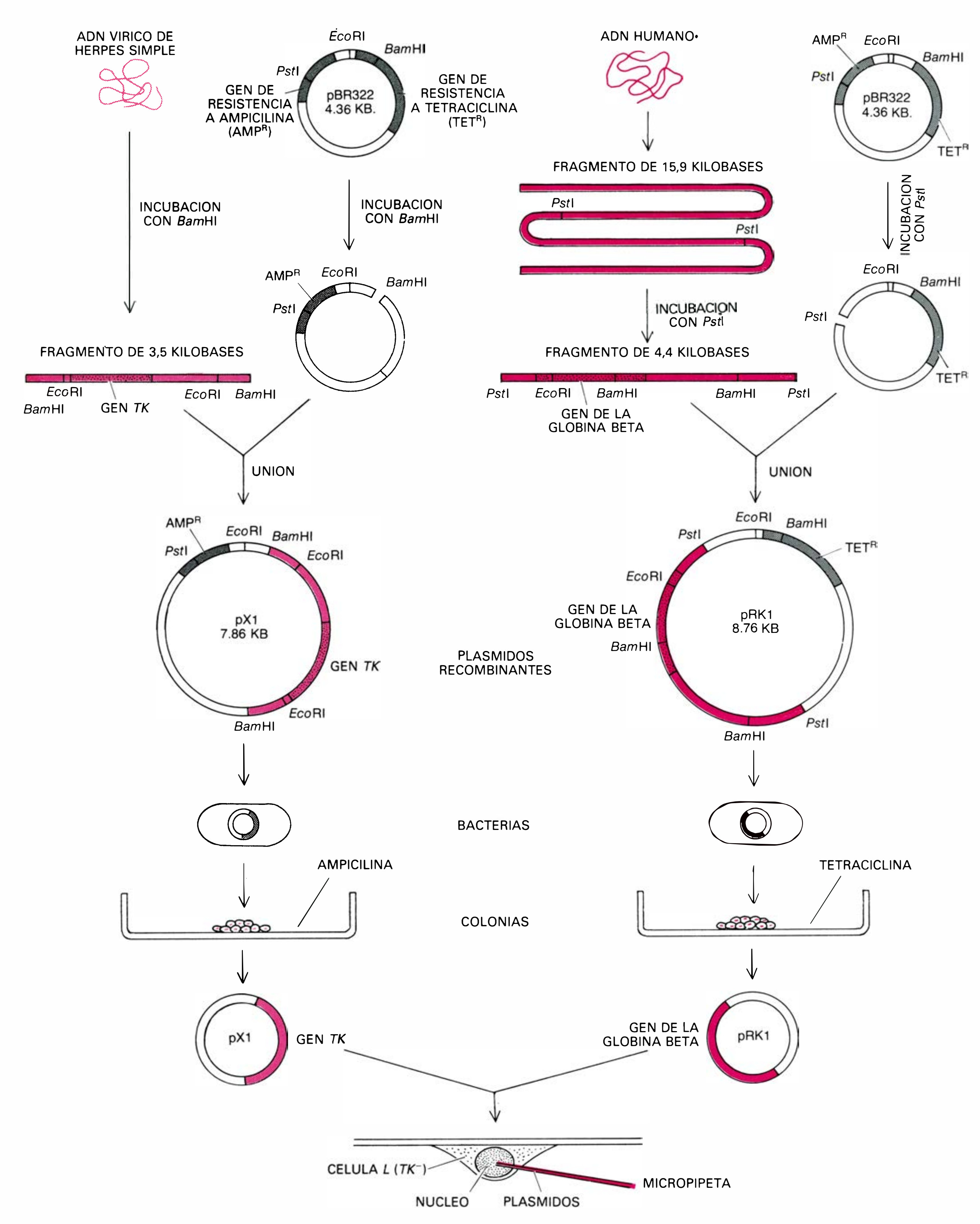
Se trataba de insertar un gen *TK* de herpes simple en una copia del plásmido llamado pBR322, y un gen de la globina beta humana en otra copia del mismo plásmido. Este plásmido tiene genes que determinan resistencia a dos antibióticos: la ampicilina y la tetraciclina.

El experimento

Para fabricar un plásmido recombinante se utiliza un grupo de enzimas denominado restrictasas. Cada restrictasa reconoce una secuencia de bases breve y específica, y corta el ADN en un sitio preciso de esa secuencia. Diferentes ADN cortados con la misma restrictasa tienen, por tanto, extremos complementarios que pueden aparearse. Lynn W. Enquist, del Instituto Nacional del Cáncer, de los Estados Unidos, William C. Summers, de la Universidad de Yale, y sus colegas trataron ADN de herpes simple con la restrictasa *Bam*HI y aislaron un fragmento de ADN de 3,5 kilobases (miles de bases) que llevaba el gen *TK*. En nuestro laboratorio del Instituto Nacional del Corazón, Pulmón y Sangre, Peter J. Kretschmer cortó el plásmido circular pBR322 con la misma restrictasa. Enquist y sus colegas unieron entonces las dos moléculas para formar un plásmido recombinante, al que llamaron pX1. El corte con *Bam*HI inutiliza uno de los dos genes de resistencia a antibióticos del plásmido; por ello, pX1 confiere, a cualquier bacteria que se replique, resistencia a la ampicilina pero no a la tetraciclina.

De forma similar, Russell E. Kaufman, Arthur W. Nienhuis y Kretschmer prepararon un plásmido recombinante con el gen de la globina. Comenzaron con un segmento de ADN humano de 15,9 kilobases que contenía el gen de la globina beta, aislado por Thomas P. Maniatis, del Instituto de Tecnología de California, y sus colegas. Tratando ese fragmento con el enzima *Pst*I obtuvieron otro más corto, de 4,4 kilobases, que llevaba el gen, e insertaron dicho fragmento en una copia del plásmido pBR322, previamente cortado con *Pst*I. El plásmido recombinante que resultó, pRK1, determinaba resistencia a la tetraciclina, pero no a la ampicilina. Los dos plásmidos recombinantes se clonaron por separado en la bacteria *Escherichia coli*, se aislaron y purificaron. De esta forma, disponíamos de dos preparaciones puras de

TECNICAS DE TRANSFERENCIA; se ilustran aquí dos técnicas para transferir un determinado gen a una célula de mamífero. En la técnica del virus recombinante (*izquierda*) se extrae el ADN de un virus como el SV40 (virus de mono). Se corta un segmento de este ADN y se reemplaza por el fragmento de ADN que nos interesa, en este caso un fragmento de ADN de conejo, que lleva el gen que determina la cadena beta de la molécula de hemoglobina. Cuando las células de mono se infectan con el virus recombinante, el gen de la globina (la proteína de la hemoglobina) se replica con el ADN del virus y se expresa. En la transferencia de genes mediada por ADN (*derecha*), los fragmentos de ADN que llevan el gen *TK* (o cualquier otro gen) se mezclan con un ADN "transportador" en una solución tamponada de fosfato. Se añaden iones calcio y se forma un precipitado de fosfato cálcico que atrapa al ADN. El precipitado se añade a un cultivo de células TK^-, que no tienen el gen *TK*. Aproximadamente una célula de cada millón incorpora el ADN de *TK* y expresa el gen; sólo estas células "transformadas" sobreviven en el medio *HAT*.



PREPARACION DE LOS PLASMIDOS RECOMBINANTES para la microinyección; uno de ellos lleva el gen *TK* (*abajo, a la izquierda*) y otro el gen para la globina beta humana (*abajo, a la derecha*). En cada caso, tanto el material de donde proceden los genes que se inyectan (ADN del virus herpes simple tipo 1, o ADN humano) como el plásmido vector (pBR322) se cortan con una restrictasa, un enzima que corta el ADN bicatenario en un sitio único de una secuencia breve y específica de bases (grupos químicos que caracterizan a las subunidades de la cadena de ADN y cuya secuencia cifra la información genética). Se indican aquí los sitios de cortes, y otros más. La longitud de las moléculas se da en kilobases. El plásmido vector lleva genes que determinan resistencia a dos antibióticos; el corte inutiliza uno de estos genes. El gen y el plásmido tienen extremos complementarios, ya que se cortan con la misma restrictasa, extremos que pueden unirse para formar un plásmido recombinante que lleve el gen deseado: *TK* (*izquierda*) y globina beta humana (*derecha*). Los plásmidos se introducen por separado en la bacteria *Escherichia coli*; las bacterias transformadas se seleccionan por su resistencia a un antibiótico. Cada célula transformada origina un clon: una colonia de células, todas con el mismo plásmido. Los plásmidos se extraen y se microinyectan.

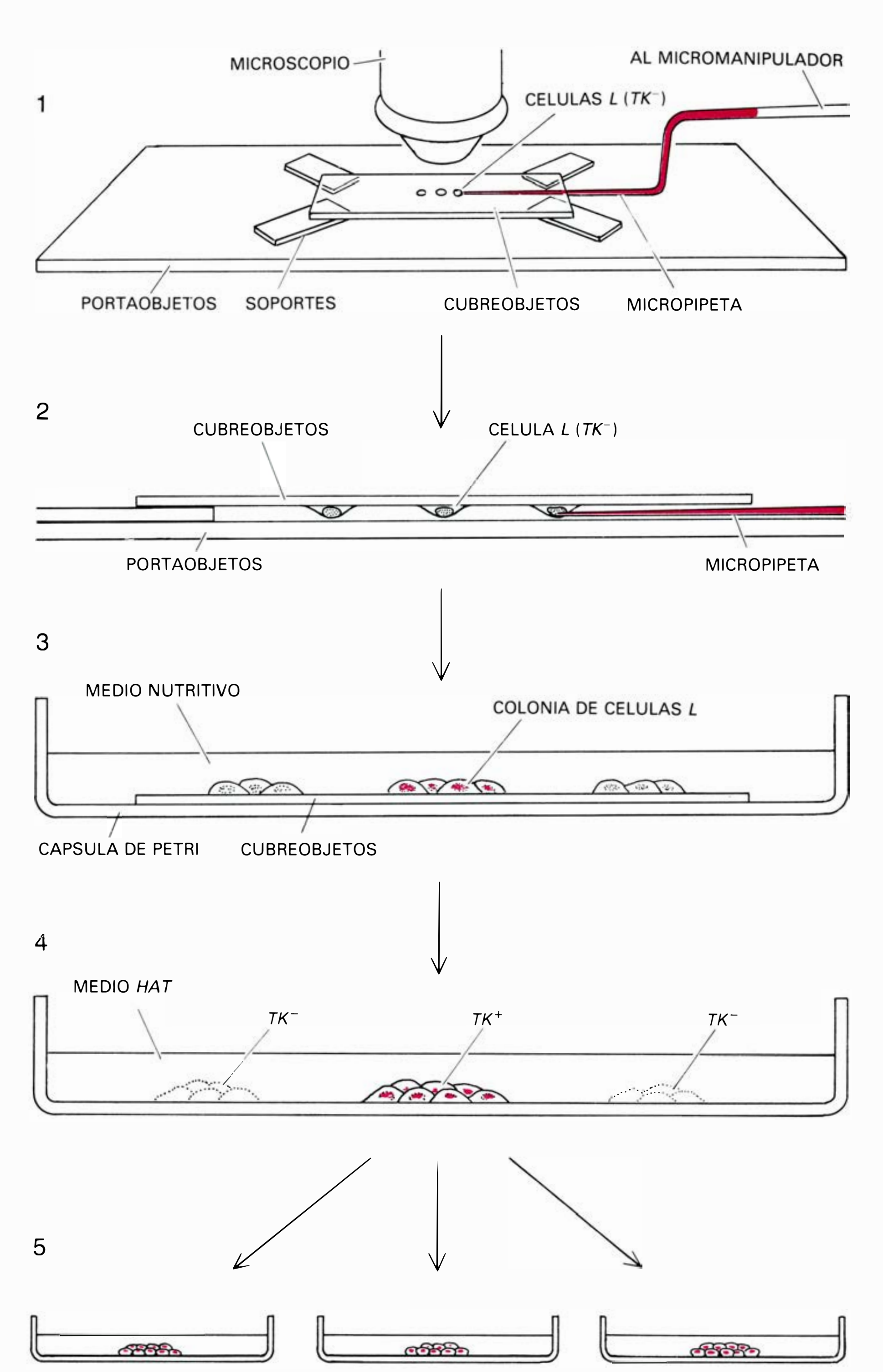
plásmidos, una con el gen *TK* y otra con el gen de la globina beta.

Lillian Killos, una estudiante graduada de la Universidad George Washington que trabajaba en nuestro laboratorio, hizo la microinyección. Puso varias docenas de células *L TK*⁻ de ratón sobre un cubreobjetos de cristal, y colocó éste, vuelto del revés, sobre un portaobjetos, separando ambos con unos soportes de cristal. Se formó así una cámara que llenó con medio de cultivo, selló sus esquinas con aceite de silicona y colocó la preparación en un microscopio binocular de contraste de fase de 2000 aumentos.

En una "microforja" construida especialmente, se fabricó una micropipeta cuyo extremo tenía un diámetro interior de 0,5 micrometros (cinco diezmilésimas de milímetro). Esta micropipeta se utilizó para inyectar un plásmido de cada tipo (por término medio) en varias de las células situadas dentro de las cámaras. Una vez realizada la inyección, se desmontaron los cubreobjetos y se incubaron las células, primero en medio normal y después en un medio estándar llamado *HAT*, donde sólo sobreviven aquellas células que sintetizan timidina quinasa. Entre tres cubreobjetos de la primera serie de inyecciones se encontraron siete colonias que se dividían, y se transfirieron a distintas cápsulas de Petri para análisis posteriores.

El hecho de que estas células sobreviviesen en medio *HAT* indicaba que tenían un gen *TK* funcional. ¿Se había producido este gen *TK* por reversión de una célula *L TK*⁻ o (como esperábamos) se replicaba y expresaba uno de los genes *TK* de herpes simple que habíamos microinyectado? Utilizando la técnica de "papel secante" de Southern, un procedimiento ideado por E. M. Southern, de la Universidad de Edimburgo, Linda Sanders-Haigh, otra estudiante graduada, de la Universidad George Washington, estableció que el gen *TK* vírico estaba presente en las células *L*. El ADN total de C2B, una de las células microinyectadas con éxito, se trató con la restrictasa *Bam*HI. Los fragmentos resultantes se separaron por tamaños mediante electroforesis en gel. Si el fragmento del virus herpes simple de 3,5 kilobases que contenía el gen *TK* estaba presente y se replicaba en el ADN de C2B, sus numerosas copias deberían formar una banda definida en el gen.

El procedimiento de Southern para buscar tales bandas se basa en el hecho de que dos cadenas sencillas de ADN con secuencias complementarias de bases hibridan, es decir, se aparean unas



MICROINYECCION, realizada con ayuda de un microscopio de contraste de fase (*1*). Se forma una cámara con el cubreobjetos que lleva las células *L* de ratón (a las que falta el gen *TK*), invertida sobre un portaobjetos. Se llena la cámara con medio de cultivo y se sella con aceite de silicona. En el núcleo de una célula se inserta una micropipeta que lleva una solución con los plásmidos, aproximadamente uno de cada tipo, (*2*). El cubreobjetos se coloca en un medio de cultivo y las células se dividen (*3*). Las células inyectadas con éxito sobreviven cuando las colonias se transfieren al medio selectivo *HAT* (*4*). Las colonias supervivientes se transfieren a cápsulas distintas y se cultivan hasta obtener un gran número de células.

con otras y se unen. El ADN separado por electroforesis se transfiere a un papel de nitrocelulosa, al que se le añade un ADN conocido, marcado con un isótopo radiactivo, que sirve de "testigo". Posteriormente, se desnaturaliza todo el ADN: se separa en cadenas sencillas. Las cadenas de ADN testigo hibridan con cualquier ADN que tenga una secuencia de bases complementaria; su radiactividad revelará la localización de la banda buscada.

Cuando Sanders-Haigh utilizó como testigo una muestra marcada del fragmento original de 3,5 kilobases que contenía el gen *TK*, se observó una

banda radiactiva en la posición del papel correspondiente a las 3,5 kilobases; ello indicaba que el gen *TK* inyectado estaba presente en el ADN de C2B y que se replicaba en las células de la colonia. Como control adicional, se trató el ADN de C2B con otra restrictasa, la *Eco*RI. El enzima *Eco*RI corta el fragmento de 3,5 kilobases por dos sitios que están separados 2,4 kilobases. Este tratamiento debería producir, por tanto, una banda de 2,4 kilobases, que se manifestaría por hibridación con parte del ADN testigo radiactivo. Y así ocurrió. Finalmente, un doble tratamiento con *Bam*HI y *Eco*RI del ADN de la colonia inyectada producía la misma banda de 2,4 kilobases, lo que ponía de manifiesto que, tal como esperábamos, el fragmento *Eco*RI de 2,4 kilobases no se cortaba con *Bam*HI. Estos y otros resultados señalaban que el gen *TK* del herpes simple se encontraba en las células microinyectadas, replicándose en ellas.

Expresión de los genes

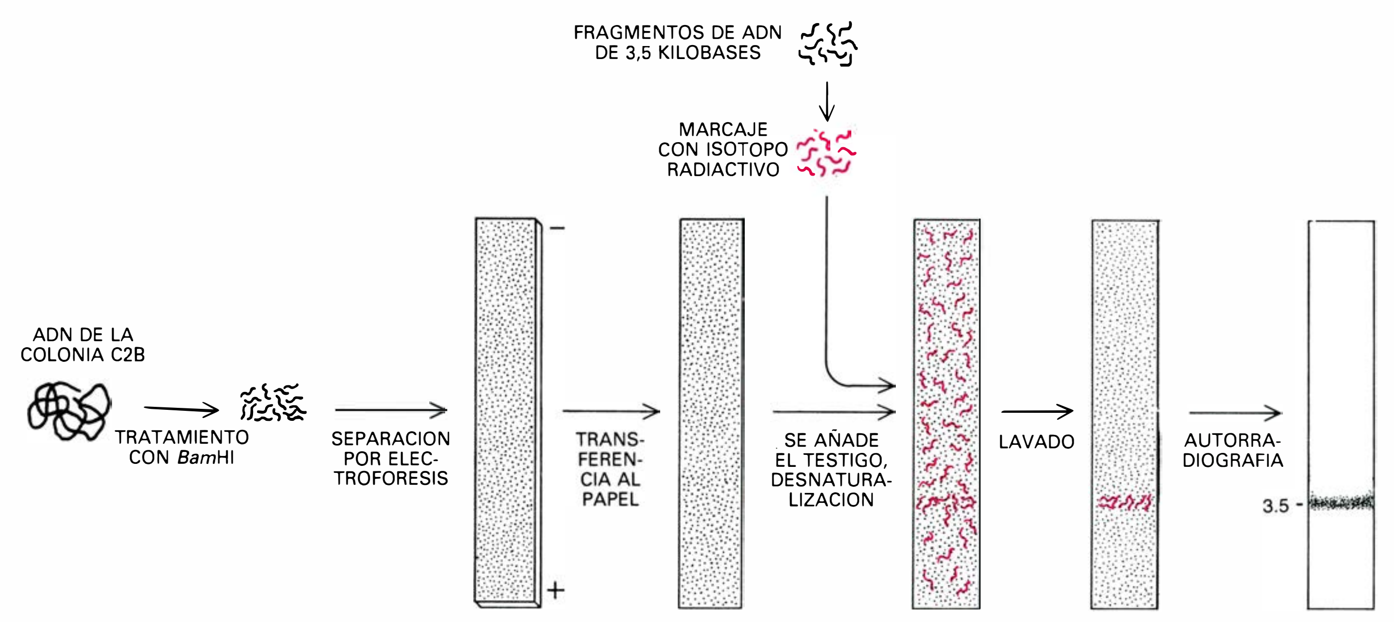
Un estudio similar indicaba la presencia del gen de la globina beta humana en las mismas células; los dos genes habían sido microinyectados con éxito y se replicaban, ya que las células inyectadas proliferaban. Pero, ¿se expresaban estos genes? ¿Se transcribían a ARN mensajero y se traducía éste para fabricar timidina quinasa funcional de herpes simple y globina beta humana normal?

William Summers y Wilma P. Summers, en Yale, han ideado un método para detectar en una célula la presencia de la timidina quinasa que determina el gen *TK* del herpes simple, y distinguirla del mismo enzima fabricado por el propio ADN de la célula de ratón. El enzima vírico convierte una molécula precursora en el nucleótido ácido citidílico; la timidina quinasa de ratón no puede hacerlo. Sin embargo, las células de ratón tienen otro enzima, una desaminasa, que permite la conversión. Hay un inhibidor, llamado *THU*, que bloquea la desaminasa de ratón. La conversión de la molécula precursora en el nucleótido, en presencia de *THU*, constituye, por tanto, una prueba de la presencia de la timidina quinasa de herpes simple. Dos de nuestras colonias se ensayaron en Yale. Las dos expresaban el gen *TK* de herpes simple inyectado, y no el de ratón. En otras palabras, el defecto TK^- en una célula *L* de ratón había sido corregido inyectando en su núcleo un gen vírico funcional. La ingeniería genética a nivel de una sola célula de mamífero había tenido éxito.

Quizás el resultado no debería habernos sorprendido; después de todo, habíamos seleccionado específicamente las células que llevaban un gen *TK* cultivándolas en el medio selectivo *HAT*. Las noticias no fueron tan halagüeñas cuando buscamos globina beta en las colonias que se habían desarrollado a partir de células microinyectadas. No encontramos la proteína. Buscamos entonces ARN mensajero específico de la globina, cuya presencia probaría, al menos, una expresión parcial del gen de la globina beta. Mediante un ensayo de hibridación, Sanders-Haigh identificó secuencias de ARN que determinaban globina beta humana. Los resultados indicaban que en cada célula *L* de ratón había sólo entre dos y diez moléculas de ARN de globina, lo que, biológicamente, no era una cantidad significativa.

El resultado de nuestra microinyección del gen de la globina coincidía, en términos generales, con el obtenido por Axel y sus colegas al insertar un gen de la globina beta del conejo en células *L* de ratón, utilizando la técnica de transferencia de genes mediada por ADN; también ellos encontraron sólo unas pocas moléculas de ARN mensajero específico de globina de conejo por célula. Además, tanto Axel como Charles Weissman, de la Universidad de Zurich, que hizo experimentos similares, observaron que en las células de ratón faltaba a veces un extremo de la molécula de ARN de globina (el extremo 5'), con lo que no se podían sintetizar moléculas completas de globina.

Desde que obtuvimos los primeros



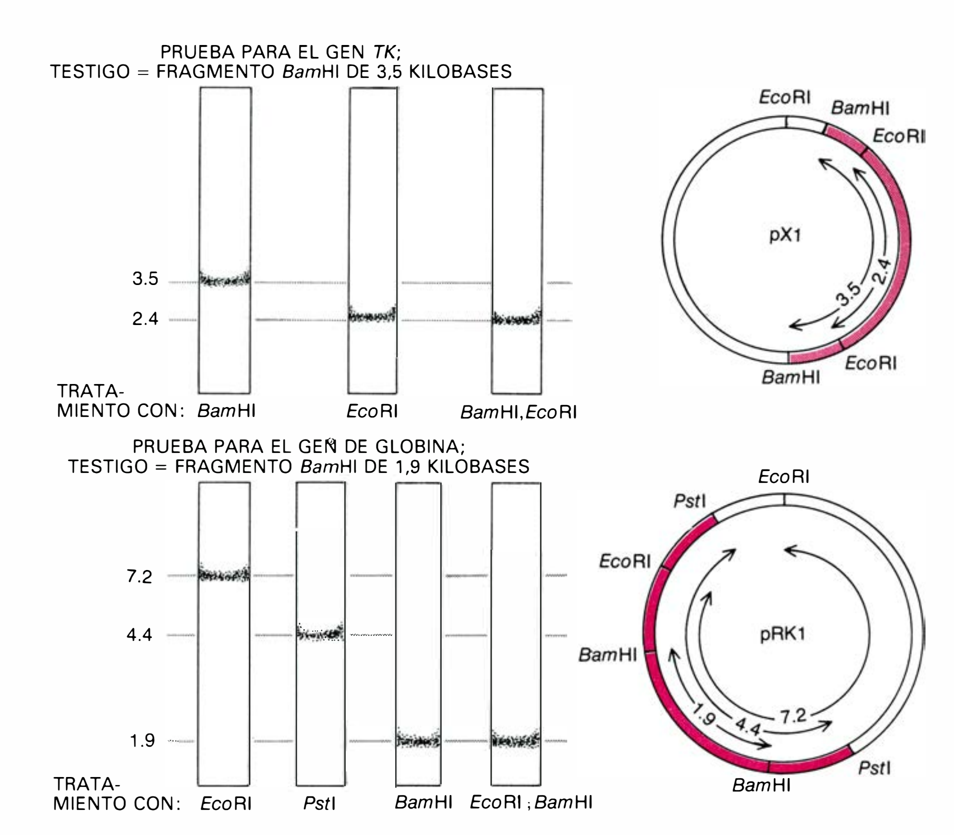
EL ADN EXTRAÑO que se replica en las colonias de células microinyectadas se detecta mediante la técnica del "papel secante" de Southern. El ADN de la colonia C2B se trata con la restrictasa *Bam*HI. Los fragmentos que resultan se separan por tamaños mediante electroforesis en gel de agarosa; cuanto más pequeños son los fragmentos, tanto mayor es la distancia que recorren hacia el polo positivo. Los fragmentos se transfieren después a un papel de nitrocelulosa. El fragmento *Bam*HI de 3,5 kilobases del virus herpes simple que lleva el gen *TK*, marcado con un isótopo radiactivo, sirve de testigo para detectar cualquier fragmento que tenga una secuencia de bases complementaria a la suya. Se añade el testigo al papel; éste se hierve para desnaturalizar el ADN y que, así, se separen las cadenas de la doble hélice. El ADN testigo se une luego a los fragmentos que tienen secuencias de bases complementarias; el resto del ADN testigo se elimina con sucesivos lavados. La autorradiografía revela una banda radiactiva en el papel, en la posición que corresponde a un tamaño molecular de 3,5 kilobases, lo que demuestra que en la colonia C2B hay fragmentos de 3,5 kilobases que son homólogos al ADN vírico testigo; estos fragmentos están presentes bien en la forma plasmídica circular original, o como largas cadenas de copias repetidas. (La ilustración es de Bunji Tagawa.)

resultados al analizar, con la técnica de Southern, el ADN de las células inyectadas, una extraña observación nos trajo de cabeza. Habíamos supuesto que los genes *TK* y de la globina que habíamos inyectado estarían integrados probablemente en varios lugares del genoma (la dotación completa de material genético, distribuido entre varios cromosomas) de la célula de ratón; si este era el caso, las moléculas testigo revelarían una distribución de bandas radiactivas de tamaño impredecible. Resultaba, sin embargo, que la mayoría de las bandas que veíamos (independientemente de la colonia analizada, la restrictasa y el testigo radiactivo utilizados) podían corresponder a fragmentos de ADN de alguno de los dos plásmidos originales, pX1 o pRK1. La distribución de bandas difería un poco según la colonia, y había bandas que, evidentemente no procedían sólo de los plásmidos microinyectados. ¿Por qué, pues, serían tan prominentes las bandas que aparentemente procedían de los plásmidos originales?

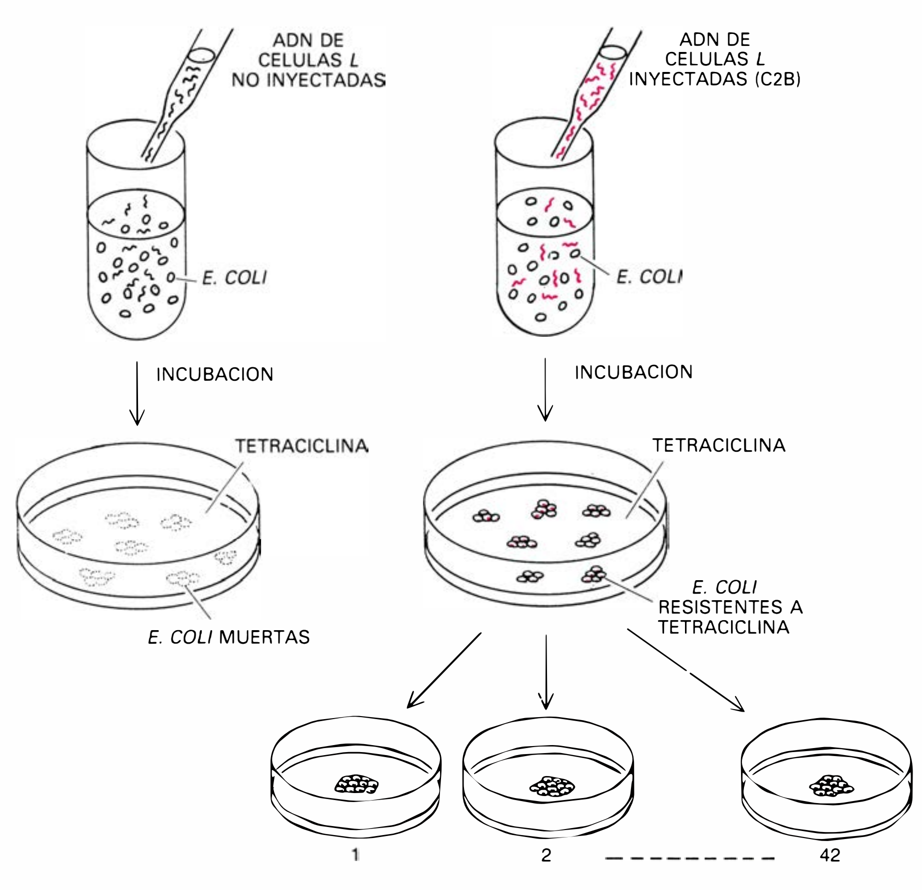
Podíamos sospechar, al menos, dos explicaciones. Primera: que hubiese muchas copias de cada plásmido, dispuestas una tras otra, de forma que el tratamiento con una restrictasa generase las mismas bandas que habrían podido originarse a partir del plásmido circular original; estas copias repetidas estarían integradas en el genoma del ratón, o bien presentes como cadenas lineales extracromosómicas. La segunda explicación sería que parte del ADN plasmídico (pBR322 con el gen insertado), o todo él, se hallara como plásmido circular extracromosómico, replicándose (o cuando menos sobreviviendo) autónomamente en las células *L*.

Extracción del plásmido

Diseñamos una serie de experimentos para determinar la estructura del ADN plasmídico en las células *L* de ratón. Una de las líneas de investigación nos llevó a resultados inesperados. Queríamos saber si los plásmidos originales, pX1 y pRK1, podían recuperarse del ADN aislado de las células *L* microinyectadas. Podía lograrse añadiendo directamente el ADN de las células *L* a *E. coli* y buscando bacterias transformadas; éstas se distinguirían por su resistencia a un antibiótico (por ejemplo, la tetraciclina en el caso de pRK1). Como control, Kretschmer y Anne H. Bowman incubaron células de *E. coli*, que eran sensibles tanto a la tetraciclina como a la ampicilina, con ADN de células *L* de ratón que no habían sido mi-



RESULTADOS OBTENIDOS utilizando la técnica de Southern (*izquierda*) y mapas de los plásmidos inyectados (*derecha*), que indican el origen de los fragmentos detectados. En cada caso se señalan el testigo y la restrictasa utilizados. Los resultados demuestran que los dos genes inyectados, el gen *TK* (*arriba*) y el de la globina beta humana (*abajo*), están representados en las células de la colonia inyectada.



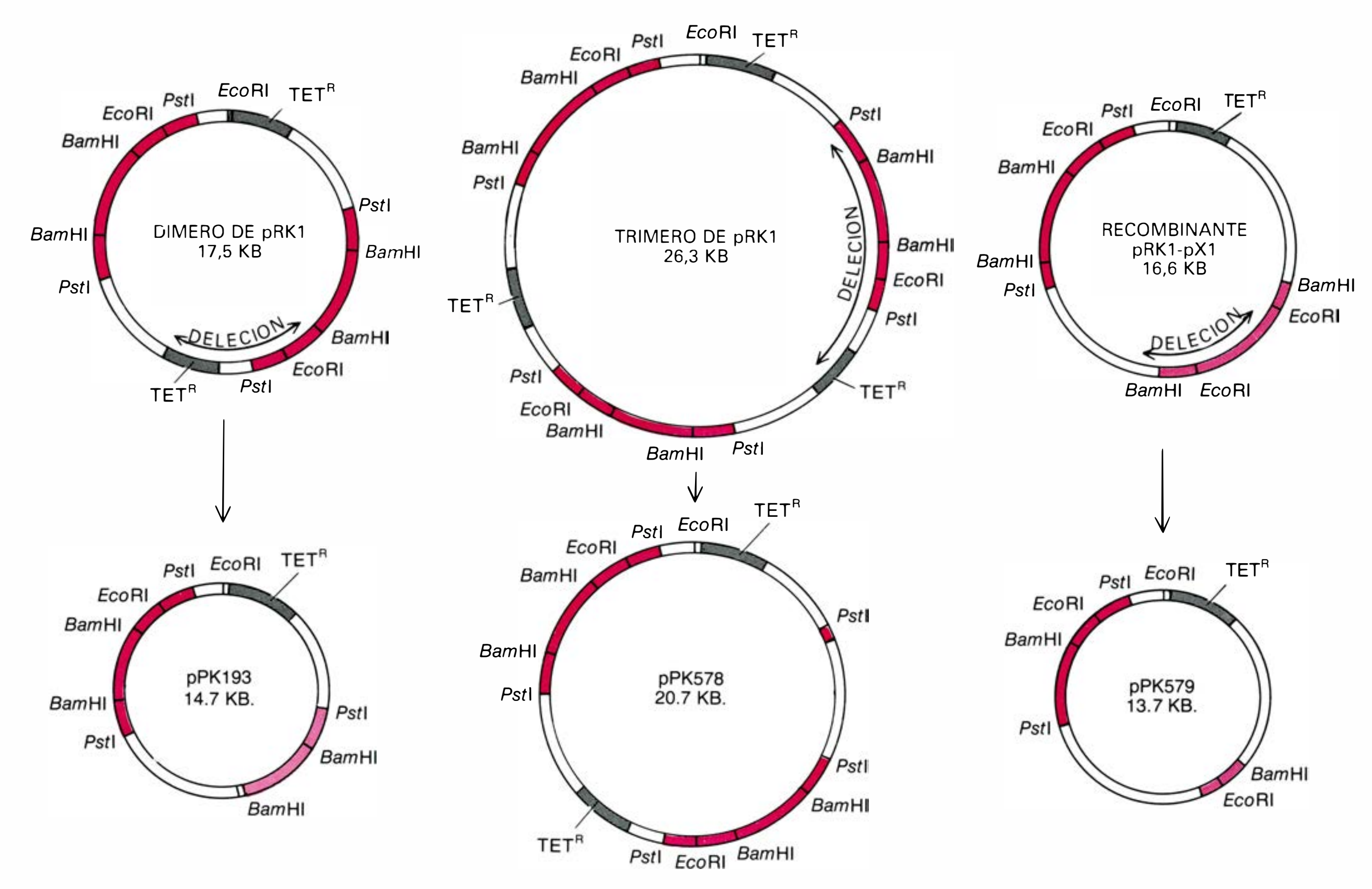
PARA RECUPERAR LOS PLASMIDOS se transformaron bacterias *E. coli* con el ADN de una colonia de células inyectadas. Los plásmidos se detectaron por su capacidad para conferir resistencia a la tetraciclina en las bacterias. Como control se utilizó, para transformar las bacterias, ADN de células no inyectadas (*izquierda*); no se obtuvieron bacterias resistentes. La incubación de *E. coli* con el ADN de células inyectadas (*derecha*) produjo 42 colonias resistentes a la tetraciclina en las que se aisló y caracterizó el plásmido.

croinyectadas. Cultivaron las células posteriormente en un medio que contenía tetraciclina y buscaron resistentes. No encontraron ninguno. A continuación, trataron las mismas células de *E. coli* sensibles al antibiótico con ADN de células inyectadas, y de nuevo buscaron transformantes resistentes. Encontraron 42 colonias resistentes a la tetraciclina. Cada una de las colonias transformadas se cultivó por separado, aislándose en cada caso el plásmido responsable de la resistencia al antibiótico. Una vez aislados los plásmidos, se trataron con varias restrictasas. Con los resultados obtenidos se elaboraron mapas de restricción de cada plásmido, que podían así compararse con los mapas del plásmido original pRK1.

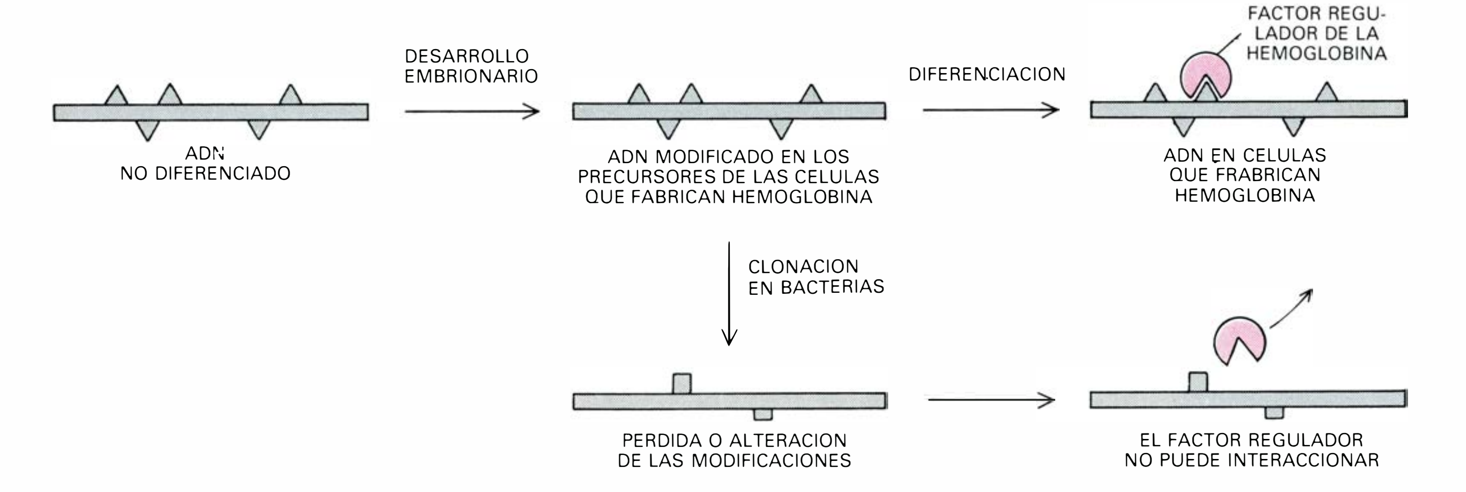
En 30 de las colonias transformadas el plásmido era idéntico a pRK1; en otras palabras, se recuperaba el plásmido original. Sin embargo, las otras 12 colonias resistentes a la tetraciclina daban resultados sorprendentes. Había cinco tipos diferentes de moléculas de plásmidos recombinantes, cuatro de las cuales parecían dímeros o trímeros de pRK1: moléculas circulares formadas por dos o tres copias unidas del plásmido original. Sin embargo, no eran dímeros o trímeros completos. En todos los casos había una deleción: se había perdido parte del plásmido. El quinto tipo de plásmido extraño tenía una estructura más complicada aún. El lector recordará que tanto pX1 (que lleva el gen *TK*) como pRK1 (con el gen de la globina) se microinyectaron en la misma célula *L* de ratón. ¿Podríamos recuperar en las colonias transformadas algunas moléculas de ADN que fueran recombinantes de los dos plásmidos originales? Kretschmer y Bowman habían identificado los transformantes de pRK1 por su capacidad para crecer en presencia de tetraciclina. Entre aquellas colonias que eran resistentes a la tetraciclina buscaron las que, además, lo eran a la ampicilina (resistencia que podía venir determinada por pX1). Hallaron cuatro colonias que eran resistentes a los dos antibióticos. Todas tenían el mismo plásmido, formado por una copia completa de pRK1 y parte de pX1.

El examen de los cinco tipos de plásmido que se recuperaron demuestra que la deleción característica comienza, siempre, más o menos en el mismo sitio del plásmido vector original pBR322. Este lugar está cerca del extremo de la región que rodea al gen de la resistencia a la tetraciclina. Aparentemente, la región constituye una "zona caliente de deleciones", un sitio cuya secuencia de bases, de alguna forma, favorece la deleción. En el vector original no se han encontrado tales zonas susceptibles de deleción específica. De lo que cabe deducir que esa región susceptible se produce cuando el ADN está en las células *L* del ratón.

¿Estaba integrado el ADN plasmídico en los cromosomas de la célula de ratón durante este tiempo, o se encontraba libre, como material extracromosómico? Michael H. Huberman utilizó un método, ideado por Bernhard Hirt, del Instituto Suizo para la Investigación Experimental del Cáncer, en Lausanne, que permitía identificar formas extracromosómicas de ADN inyectado que pudieran estar presentes en las células *L*. Se fraccionó por centrifugación el ADN de las células *L*: las moléculas grandes de ADN (cromosómico) sedimentaban, mientras que las que tenían menos de 100 kilobases (ADN extracromosómico) quedaban suspendidas en el sobrenadante. El ADN del sobre-



MAPAS DE LOS PLASMIDOS RECUPERADOS; se construyeron tratando los plásmidos con una batería de restrictasas. Aquí se esquematizan tres de estos mapas (*línea inferior*). Cada plásmido parece derivar, por deleción, de una estructura anterior (*línea superior*) o de cadena de copias repetidas. El plásmido pPK193 puede resultar de la deleción de 2,8 kilobases de un dímero de pRK1 (compuesto por dos plásmidos pRK1 unidos); otra deleción, en un trímero de pRK1, podría haber producido a pPK578; pPK579 parece proceder de la deleción de 2,9 kilobases de un plásmido recombinante pRK1-pX1.



LA FALTA DE EXPRESION de un gen de la globina transferido puede explicarse de varias formas. Pudiera ser que el ADN de una célula designada para una tarea particular (como, por ejemplo, la fabricación de hemoglobina) se modifique en el embrión, en cuyo caso, cuando la célula se hubiera diferenciado, algunos factores reguladores reconocerían las modificaciones específicas y activarían la síntesis de globina (*arriba*). En otras palabras, el gen de la globina (o sus alrededores), además de la información necesaria para fabricar la proteína, llevaría otra información adicional. O bien, cabría que la clonación de dicho gen en una bacteria eliminara o alterase las modificaciones embrionarias de forma que resultara entonces imposible su regulación (*abajo*).

nadante era más eficaz (microgramo por microgramo) en la transformación de *E. coli* que el material sedimentado. Lo que ponía de manifiesto que, en las células inyectadas, al menos parte del ADN de pRK1 era extracromosómico.

A partir de los resultados obtenidos en nuestro laboratorio, y en otros, hemos llegado a la conclusión de que muchas copias repetidas de pRK1 y pX1 se combinan concatenadamente y, así, se replican dentro de la célula de ratón. Parte de este material puede estar integrado, pero al menos una porción es extracromosómica; también podría haber algunos plásmidos circulares. Y es probable que las deleciones que producen tales plásmidos recombinantes extraños se den en la bacteria durante la fase de extracción del plásmido.

Con independencia de dónde tengan lugar esos sucesos, está claro que algo debe ocurrirle al ADN del plásmido vector original, a su paso por la célula de ratón, para que se genere una zona altamente susceptible a la deleción. Si la deleción se produce en la célula de ratón, debe haber en ella un enzima implicado en la deleción de esta zona susceptible. Si ocurre más tarde, en la bacteria, habrá que pensar en que un enzima de la célula de ratón ha modificado el lugar al objeto de que un enzima bacteriano pueda reconocerlo posteriormente como sitio para llevar a cabo la deleción. La posibilidad de que ello sea así resulta intrigante. Implica que los enzimas que modifican el ADN en las células de mamífero son capaces de reconocer determinados lugares del ADN bacteriano (o quizá de cualquier ADN) y alterarlos de manera muy específica (sin cambiar la secuencia de bases), a fin de que puedan ser reconocidos por otros enzimas específicos. Algunos de estos procesos pueden utilizarse a lo largo del desarrollo embrionario para controlar la expresión génica durante la diferenciación celular.

Aunque no está claro de qué forma los genes inyectados están presentes en la célula *L*, lo cierto es que el gen *TK* parece expresarse normalmente. ¿Por qué el gen de la globina se expresa sólo mínimamente? La respuesta inmediata puede ser que las células *L* no son células eritroides y, por tanto, podrían carecer de ciertos factores reguladores necesarios para la inducción de la expresión del gen de la globina. Pero tampoco se induce el gen de la globina beta humana cuando se transfiere a una célula de eritroleucemia del ratón (*MEL*), capaz de fabricar 10.000 moléculas de ARN mensajero de globina de ratón. ¿Dónde está, pues, el obstáculo?

La actividad de la timidina quinasa se hace patente en todas las células, ya que está implicada en la síntesis de ADN. Quizá su regulación sea muy simple: tal vez esté siempre "conectada". Por otro lado, el gen de la globina beta humana se halla dentro de una extensa región del genoma que determina muchas cadenas diferentes de globina. En las células eritroides, los diferentes genes de globina se conectan y desconectan secuencialmente durante el desarrollo del organismo, de embrión a feto y a recién nacido. Quizás hay varias regiones reguladoras distribuidas a lo largo de las 65 kilobases (o más) de la región de la globina, y todas ellas (o al menos la mayoría) son necesarias para una correcta regulación del gen de la globina beta. Si así se plantea el problema, la solución sería inyectar, además de un fragmento pequeño de ADN con el gen de la globina beta, la región completa de la globina; pero de momento no se pueden clonar fragmentos tan largos. Una alternativa sería encontrar y aislar todas las regiones reguladoras necesarias, unirlas entre sí y añadirlas al gen de la globina beta; la transferencia de una molécula recombinante de estas características podría determinar entonces la expresión normal de una globina extraña en una célula eritroide.

Recientes estudios con hibridación de células somáticas sugieren la desconcertante posibilidad de que tales manipulaciones quizá no sean suficientes. Albert B. Deisseroth, ahora en el Instituto Nacional del Cáncer, y Marcia C. Willing, de nuestro laboratorio, encontraron que, cuando una célula eritroide de ratón y otra humana se fusionaban, el híbrido resultante sintetizaba ambas cadenas de hemoglobina, la de ratón y la humana. Deisseroth halló que el híbrido sintetizaba ambas cadenas de hemoglobina, la de ratón y la humana, aun cuando se fusionara la célula eritroide de ratón con un linfoblasto humano (que, si bien no fabrica hemoglobina, desciende de una célula precursora que también puede dar lugar a una célula eritroide). Al fusionarse las células de ratón con fibroblastos de la piel humanos (que no guardan relación alguna con la línea de células eritroides), el resultado era diferente. Se transcribía el ARN mensajero que determina globina humana, pero no se sintetiza-

ban cadenas de globina humana; la hemoglobina de ratón sí se sintetizaba.

Estos resultados sugieren que la propia historia epigenética de la célula a partir de la cual se obtiene el ADN de globina pueda tener algo que ver. Quizá la célula precursora modifique el gen de la globina de manera que, cuando el gen se activa en una etapa posterior, pueda transcribirse a ARN mensajero normal. En el caso de un gen de globina de fibroblasto, ni siquiera cuando se pone en un "ambiente eritroide" (por fusión celular) y se transcribe ARN mensajero de globina, se traduce éste a proteína. Quizás haya enzimas que modifican algunos sitios en las cercanías de un gen, de forma que puedan reconocerlos más tarde factores reguladores. Esta modificación puede ser, por ejemplo, la adición de un grupo metilo (CH_3) o cualquier otro a unas bases determinadas; se ha demostrado una correlación entre el grado de metilación y la actividad o falta de actividad de algunos genes, incluidos los de la globina.

Si la propia historia de un gen a lo largo del desarrollo celular cumple algún papel destacado, tal vez sea ésa la causa de la relativa inactividad de los genes de globina de mamífero clonados en bacterias y transferidos posteriormente a células de mamífero. Quizás el paso de un gen de globina a través de la bacteria altere o elimine modificaciones previas del gen. Si este es el caso, los genes clonados sólo se regularán y expresarán normalmente cuando se haya descubierto la naturaleza de las modificaciones previas, y éstas puedan practicarse en el laboratorio. La ingeniería genética en mamíferos tiene todavía un largo camino que recorrer. Los resultados expuestos en este artículo demuestran que la ingeniería genética es factible en células de mamífero, al menos cuando se trata de genes con una regulación sencilla, como el gen *TK*. El paso siguiente en la terapia génica de niños que padecen enfermedades hereditarias es aprender a corregir células defectuosas, no en un cultivo de laboratorio, sino en animales experimentales con defectos genéticos: reemplazando primero genes "sencillos" y luego los que precisan una regulación más compleja, como los de la globina. El desarrollo de líneas de ratones que padecen talasemia alfa, una enfermedad seria de la patología humana, facilitará la investigación. La ingeniería genética debería ser viable en animales de experimentación en un futuro próximo, para que, luego, pueda llegarse a la terapia génica en seres humanos.

LUCIERNAGAS APAREANDOSE, colgadas del refugio que representa una hoja. El macho, que es el individuo de abajo, sujeta los élitros de la hembra con las dos patas anteriores y tiene las patas medias levantadas. Estas luciérnagas son de la especie *Photuris hebes*, de los Estados Unidos orientales.

HEMBRA DEPREDADORA de la especie *Photuris versicolor*. Cuando los machos de otras especies advierten de su propia presencia en su búsqueda de pareja, las hembras de *P. versicolor* imitan las respuestas de una hembra de la misma especie que los machos, y devoran a cuantos caen en el engaño.

Mimetismo en las señales sexuales de las luciérnagas

Los machos emiten destellos en su vuelo nocturno en busca de pareja, a los que responden las hembras desde el suelo. Hembras de otras especies emiten también respuestas y devoran a cualquier macho que, engañado, se ponga a su alcance

James E. Lloyd

La sinfonía de destellos y titilaciones de un prado repleto de luciérnagas infunden al espectador la bucólica sensación de hallarse ante un mundo alejado de la competencia, el engaño y la depredación. Puro espejismo. La limitación de los recursos, entre ellos la cantidad de hembras sin aparear y el alimento, hacen de la competencia una parte inevitable de la vida. Esta lucha se percibe más fácilmente entre las luciérnagas que entre otros insectos, porque en buena proporción está mediada por la bioluminiscencia.

La mayoría de las luces danzantes en un prado de lucernas son las señales de advertencia que emiten los machos en busca de pareja. Con poco esfuerzo, un observador puede llegar a reconocer las especies de luciérnagas por sus destellos. Por regla general, en una zona determinada cada especie tiene su señal del macho y respuesta de la hembra propias y únicas. Las características que identifican la señal son la duración del destello, el número de destellos en una pauta de señal, el ritmo de los destellos en la pauta y la tasa de repetición de la misma. Se conocen, por lo menos en un cierto grado, las señales de los machos de unas 130 especies de luciérnagas de todo el mundo. Yo mismo he analizado las pautas de más de 80 especies a partir de registros de campo de machos en vuelo libre.

De esas 130 pautas de señales, unas 60 consisten en destellos únicos de una secuencia continua, emitida a varias velocidades características. Otras 30 especies de luciérnagas tienen pautas de señales que constan de grupos de destellos que van de dos a 11 destellos por grupo. Otras 30 especies tienen una pauta de señal titilante, por lo general de cinco a 11 picos de resplandor, a velocidades de hasta 20 picos por segundo. Finalmente, unas 20 especies emiten destellos con lo que se ha denominado modulación críptica, porque su frecuencia (más de 30 destellos por segundo) es demasiado elevada para que el ojo humano pueda detectarla.

Lo que hace que la pauta de una especie determinada sea distintiva no es sólo la tasa de destellos o de titilación, sino también el aumento y la disminución de la intensidad del destello y la modulación de la intensidad en el destello mismo. El destello más corto que he observado es la espiga de 40 milisegundos de *Photuris potomaca*, una luciérnaga que vive en el curso del río Potomac y sus principales afluentes. Aunque algunas especies de lucernas emiten resplandores que duran varios minutos, el destello más largo que he visto es el *crescendo* de cinco segundos de una raza de Missouri de *Photuris lucicrescens*. La titilación más rápidamente modulada es la de *Photuris* "D", una de las varias especies de Florida que todavía no han recibido nombre; en tardes calurosas, su titilación alcanza más de 40 picos por segundo.

En todas las luciérnagas, la tasa de centelleo cambia de modo predecible con la temperatura ambiente. Por mor de tales cambios y debido a la sutileza de los elementos, genuinos de cada especie, de muchas pautas de exhibición, la identificación segura de los machos de luciérnaga en el campo suele requerir varios tipos adicionales de información, tanto de comportamiento como ecológicos. Entre ellos se cuentan la velocidad del vuelo, altitud durante la emisión de luz, maniobras a lo largo de la emisión luminosa, hábitat, espacio de actividad dentro del hábitat, tiempo de actividad y época del año.

Las pautas de destello de la luciérnaga macho constituyen sólo la mitad del código específico de la especie. La otra mitad es la respuesta de la hembra en el diálogo del cortejo. En la mayoría de los casos, las respuestas de la hembra a la señal del macho son pulsos cortos, no modulados. Cabe reseñar como excepciones a esta generalización los destellos repetidos de la hembra de *Photinus obscurellus*, una especie que habita en las marismas de los Estados Unidos nororientales, y el resplandor de varios segundos de duración que *Photinus tanytoxus*, una especie de las praderas de Florida, emite a veces después del centelleo. Estas complicaciones ofrecen un blanco conspicuo a un macho que se acerca.

La característica del destello de la hembra que con frecuencia muestra variaciones significativas entre especies, y el rasgo más crítico de dicha respuesta, es su sincronización con respecto al destello masculino. Por ejemplo, a 24,5 grados Celsius, la hembra de la especie de luciérnaga de los Estados Unidos orientales *Photinus ignitus* espera tres segundos antes de contestar a la señal del macho. (A 13 grados, el tiempo de demora es de unos nueve segundos.) Los tiempos de demora de las hembras de otras especies de luciérnagas son más cortos. La combinación de la pauta de señal del macho con la respuesta demorada de la hembra constituye el código definidor de la especie. Hace tiempo que se está de acuerdo en que este código desempeña una función importante en el mantenimiento del aislamiento reproductor cuando individuos de especies distintas se hallan a la distancia de emitir y captar señales.

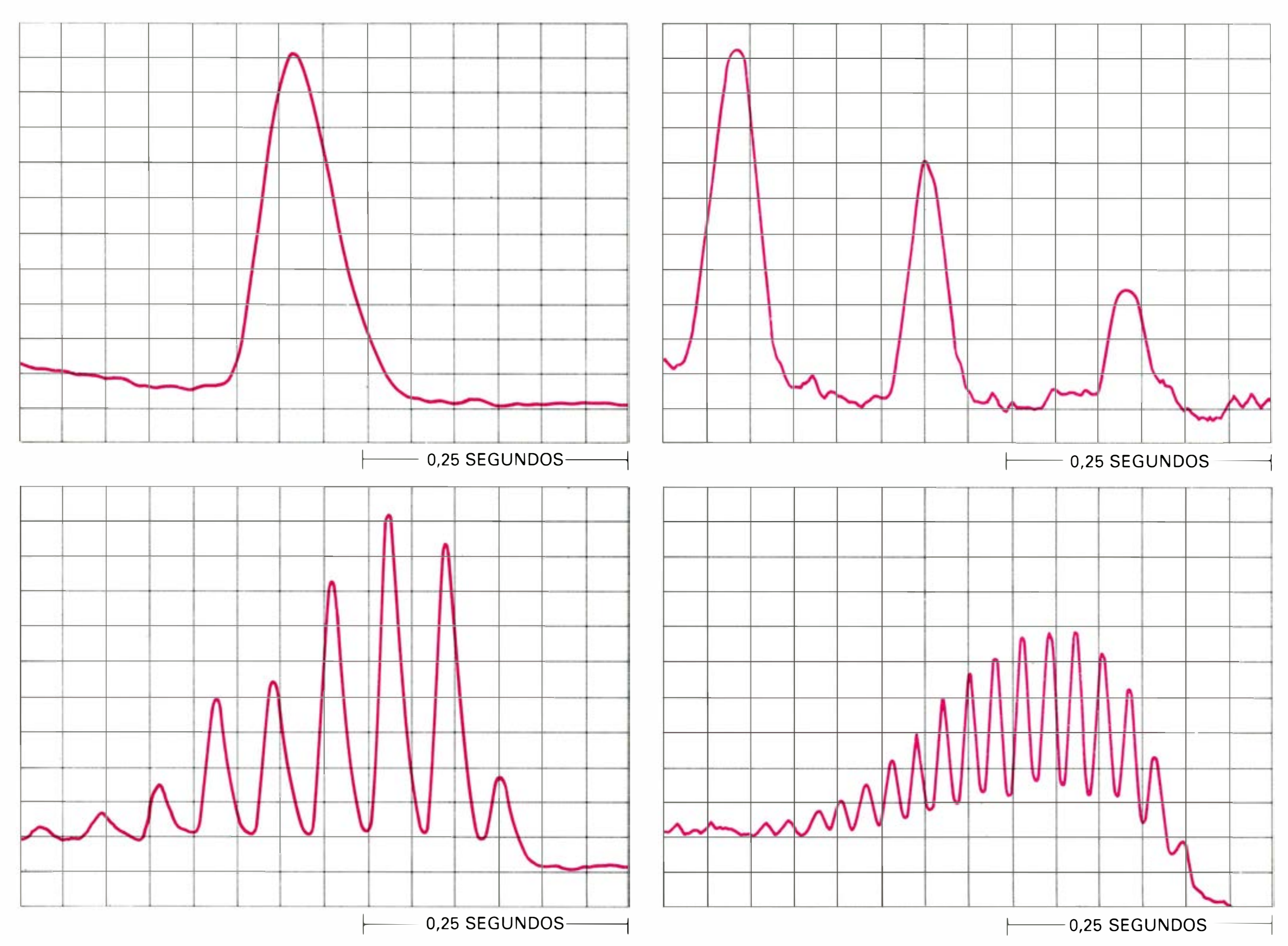
En cualquier tarde, el prado de luciérnagas puede contener muchos más machos en busca de pareja que hembras; la proporción puede ser de 50 a una. Habrá, pues, una intensa competencia entre machos; y habrá quien tarde mucho en encontrar una posible pareja. Al emitir su destello de luz, la hembra queda en seguida al descubierto. Con el fin de cuantificar el esfuerzo

y el éxito de apareamiento del macho, he seguido a varios de la especie *Photinus collustrans* en su caza crepuscular.

Esta luciérnaga se manifiesta sexualmente activa de 15 a 20 minutos cada tarde, empezando unos 20 minutos después de la puesta del sol. Su período de búsqueda de pareja transcurre entre el momento en que todavía es crepúsculo y el inicio de la actividad sexual de la especie de luciérnaga *Photinus tanytoxus*, estrechamente emparentada, que inicia su búsqueda de pareja unos cinco minutos después de que termine la especie de vuelo más temprano. La breve duración de la búsqueda de pareja de los machos de *P. collustrans* y el hecho de que su espacio de actividad en los pastizales de Florida sea prácticamente bidimensional, los hace sujetos ideales para un estudio cuantificado del comportamiento de búsqueda de pareja.

En mi seguimiento a los machos, me servía de una rueda giratoria con un contador para medir la distancia. También contaba los destellos y los choques y registraba la duración de cada vuelo. Durante varias estaciones, he seguido el rastro de 199 machos de *P. collustrans* a lo largo de una distancia total de 30 kilómetros. Los machos emitieron destellos 7988 veces. (Su pauta de destellos es una señal única de 0,3 segundos que se repite cada dos segundos.) Hubo sólo 11 choques, cada uno de los cuales ocasionó una pérdida de tiempo de vuelo de hasta 15 segundos. De los 199 machos en busca de pareja únicamente dos encontraron hembras de su propia especie y se aparearon. Sin embargo, los destellos de los machos fueron contestados por 11 hembras de otra especie de luciérnaga que imitaba la señal de respuesta de las hembras de *P. collustrans*; uno de los machos que yo controlaba invirtió cuatro minutos de su limitado tiempo investigando la respuesta de una de estas mimetas. Parece, pues, que durante el vuelo vespertino del macho de *P. collustrans* la luciérnaga viaja por término medio una distancia de un kilómetro y emite 455 destellos. Este explorador medio tiene una probabilidad de 0,63 de chocar y una probabilidad de 0,14 de encontrar pareja. Lo que significa que un macho promedio debe emprender 7,1 búsquedas vespertinas para encontrar pareja.

La hembra tiene éxito mucho antes. Cuando la hembra de *P. collustrans* sale de su madriguera, al crepúsculo, puede captar la atención de un macho en vuelo, atraerlo al suelo, copular (durante 90 segundos) y volver a su madriguera; todo ello en unos seis minutos. Cuando la hembra desaparece, el ma-



SEÑALES SEXUALES de las luciérnagas macho, que corresponden a cuatro categorías, ilustradas aquí mediante los trazados de los registros de campo que convierten las lecturas del fotomultiplicador en sonido grabado en una cinta magnética. Las barras de tiempo de los cuatro ejemplos indican intervalos de 0,25 segundos. Los segmentos irregulares de los trazados se deben al "ruido" electrónico (*valles*) o a una sobrecarga del registrador (*picos*). Arriba a la izquierda se muestra un destello único que, emitido a distintas frecuencias características, es típico de unos 50 de las 130 especies de luciérnagas de las que se conoce la señal de los machos. Es un registro de la especie *Luciola peculiaris*, realizado en Nueva Guinea a una temperatura de 21 grados Celsius. Arriba a la derecha se recoge un grupo de destellos; este tipo de señal, que puede constar de dos a once destellos por grupo, es típico de 30 especies de luciérnagas. El grupo de tres destellos que se ve aquí es la señal de *Photuris versicolor*, registrada en Florida a una temperatura de 21,5 grados Celsius. Abajo a la izquierda hay una titilación; esta señal, con hasta 11 picos de resplandor a frecuencias de hasta 20 picos por segundo, es típica de 30 especies de luciérnagas. La titilación de múltiples picos que aquí se muestra es la señal de *Photinus evanescens*, registrada en Jamaica a una temperatura de 21,5 grados Celsius. Abajo a la derecha están los picos de lo que se denomina señal críptica: rápidos picos de resplandor que el ojo humano no puede descomponer. Típicas de 20 especies de luciérnagas, estas señales crípticas pueden alcanzar una frecuencia de 45 picos por segundo. La señal en cuestión corresponde a una especie innominada de *Photuris*, "D", registrada en Florida a una temperatura de 24,5 grados Celsius. Ilustración de Albert E. Miller.

cho retorna de inmediato al aire y a la competencia. Una y otro corren el riesgo de ser atacados por un depredador si permanecen en el lugar del apareamiento.

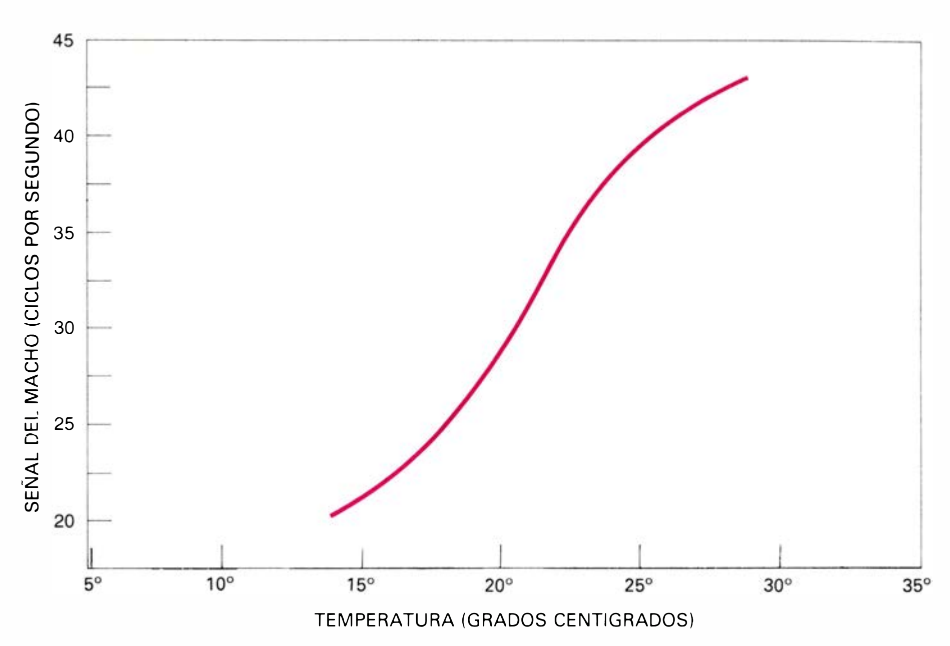
Aunque la mayoría de luciérnagas adultas no son carnívoras, entre las sesenta y pico especies del género *Photuris* las hembras de la mayoría de las especies constituyen una excepción de esa regla. Atraen y devoran a los machos de otras especies de luciérnagas; debe destacarse, por su enorme parecido y versatilidad, su mimetismo de las hembras a cuyos machos reclaman. La hembra cazadora vuela hasta una zona donde la especie a apresar es activa, y se instala en el suelo o cerca del mismo. Cuando un macho presa emite destellos en las proximidades, la hembra de *Photuris* responde con la contraseña femenina característica de la especie presa. El macho vuela más cerca y vuelve a emitir destellos. El macho ha de apresurarse siempre. Si actúa con lentitud, los rivales de las proximidades verán el cortejo e irrumpirán en él. Pero un error en la identificación podría ser fatal. El macho atraído puede responder emitiendo destellos varias veces, acercándose y alejándose. Algunos machos abandonan entonces, otros se entretienen y los hay que descienden al suelo a pocos centímetros de la luz que les respondió. Basado en mis propias observaciones de cuatro especies presa, he llegado a la conclusión de que el 16 por ciento de los machos atraídos caen en el señuelo y son comidos cuanto toman tierra cerca de la hembra depredadora (que puede tener un tamaño varias veces superior al suyo).

Las hembras de dos especies de *Photuris* de Florida poseen un extenso repertorio mimético y atacan a los machos de más de una especie. La hembra de *Photuris versicolor* puede atraer a machos de por lo menos otras cinco especies de luciérnagas, que incluyen miembros de los tres géneros principales de luciérnagas norteamericanas: *Photinus, Pyractomena* y su propio género, *Photuris*. Al modificar sus señales falsas según la especie que buscan, las hembras de estas especies de *Photuris* no sólo ajustan las características de la forma del destello, sino también su ritmo. Y acomodan la respuesta a la pauta de destellos del macho que detectan.

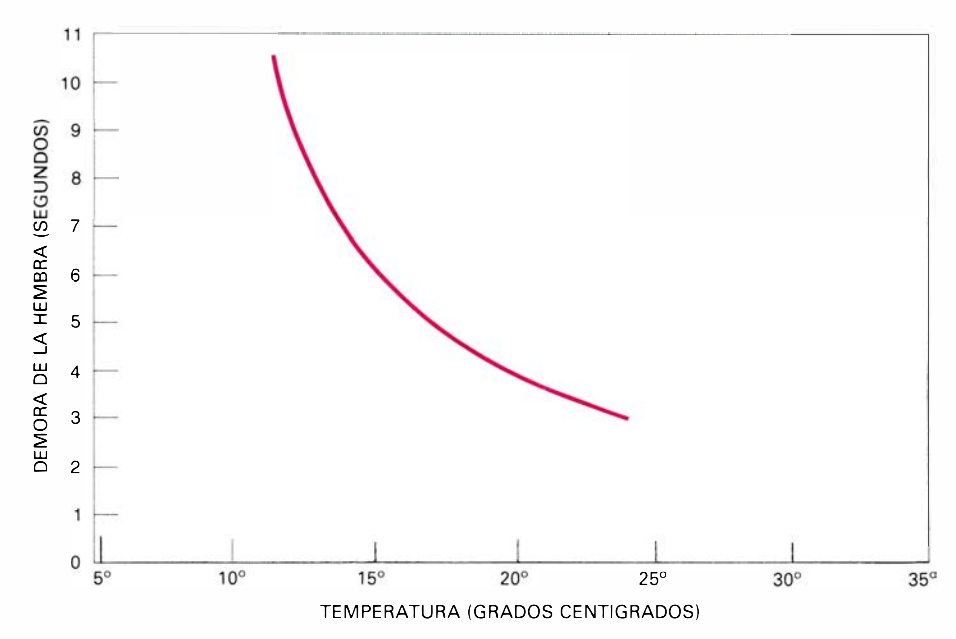
Por ejemplo, una hembra de *Photuris versicolor* contesta al destello de medio segundo de un macho de *Photinus tanytoxus* cual si fuera una hembra de su especie: un destello largo seguido de un resplandor menguante. Si a la hembra de *Photuris versicolor* se le muestran dos destellos cortos separados dos segundos (que es la pauta del macho de *Photinus macdermotti*), aquélla emite su destello después del segundo del macho, como haría la hembra de *P. macdermotti*. He realizado experimentos con estas hembras en el campo, utilizando una pequeña linterna para simular los destellos de varias especies de presa, y cuando por las cercanías pasaba un macho de luciérnaga emitiendo señales de una especie distinta de la que yo estaba simulando, mis sujetos experimentales respondían adecuadamente al intruso.

Las hembras de *Photuris* quizá tengan una táctica de reserva para mejorar su porcentaje de capturas si las falsas señales por sí solas no bastan. En varias ocasiones, mientras me encontraba enviando pautas de destellos de presa a las hembras depredadoras, éstas se posaron sobre mi mano, la linterna o se estrellaron contra mi cara. ¿Acaso lanzan ataques aéreos contra los machos dubitativos y cautelosos?

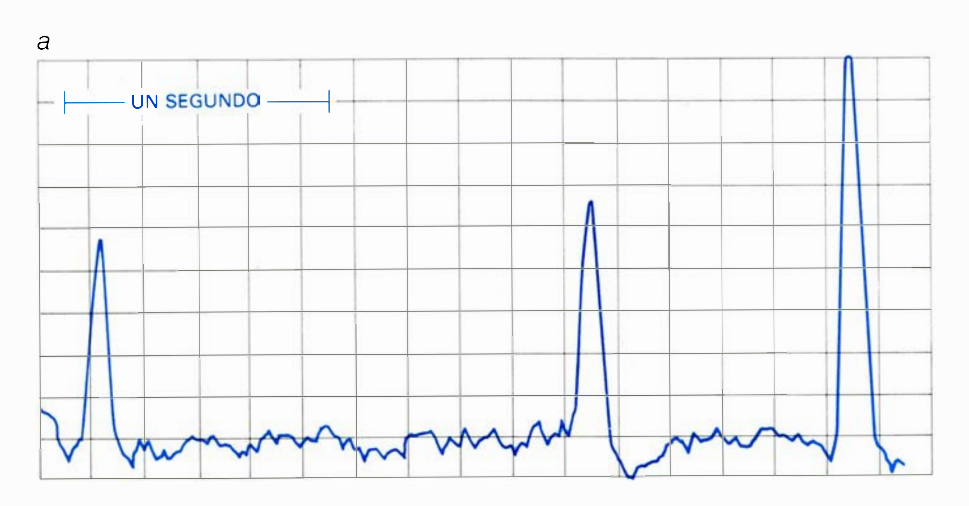
El comportamiento mimético de las hembras de *Photuris* ha incidido profundamente en la conducta de apareamiento de los machos de *Photinus macdermotti*. Esta especie de pequeña lucerna es depredada por las hembras de tres especies de *Photuris*, al menos. El

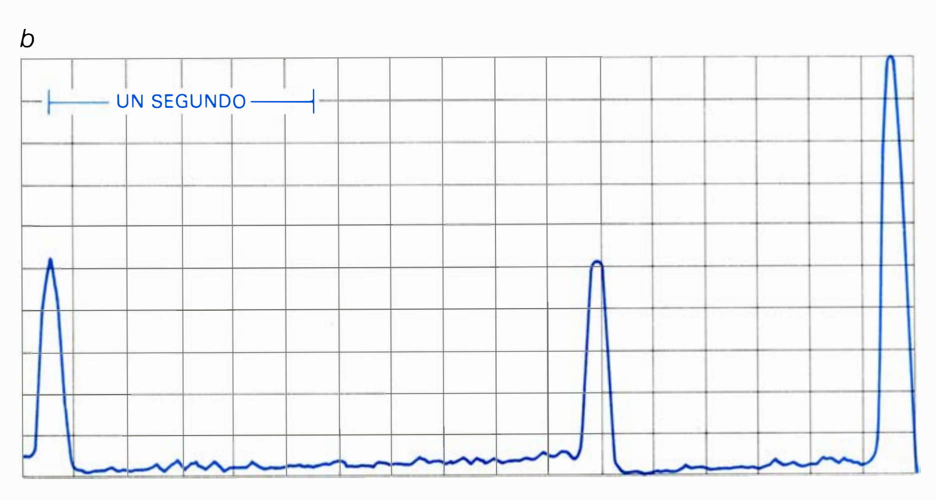


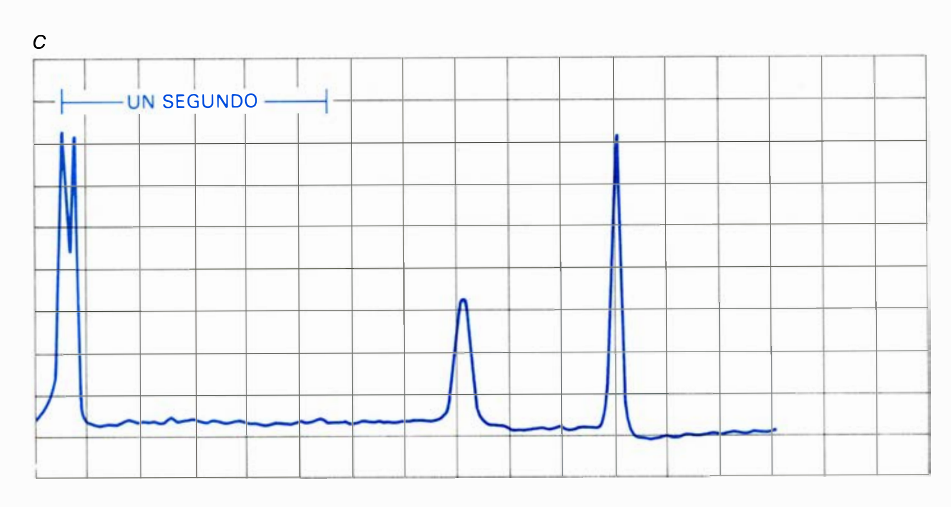
LA TEMPERATURA AMBIENTE afecta la frecuencia de la señal sexual de la luciérnaga macho. La curva sigue la frecuencia en aumento de la titilación de un macho de la misma especie, *Photuris* "D", desde 26 ciclos por segundo, a una temperatura del aire de 14,5 grados C, hasta 42,5 c. p. s., a 28 grados C.

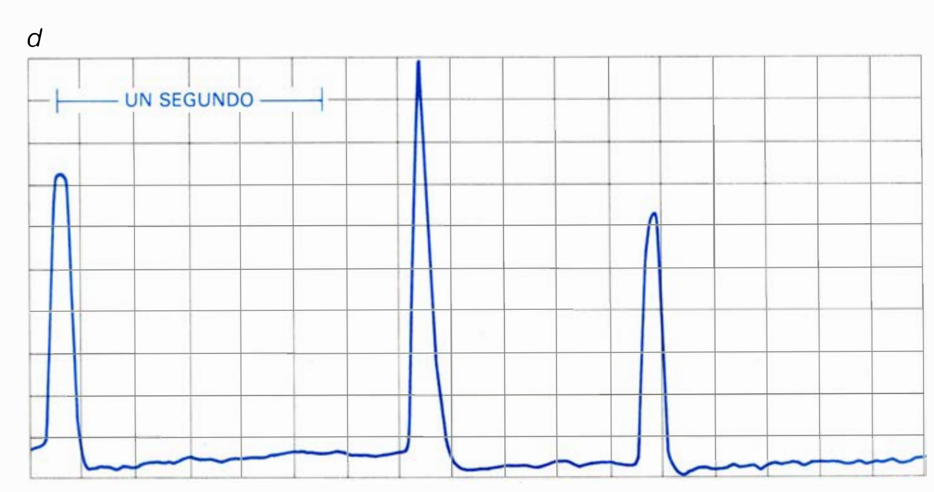


RESPUESTA DEMORADA de una luciérnaga hembra a la señal sexual del macho, que también se ve afectada por la temperatura ambiente. La curva sigue la demora de una hembra de la especie *Photinus ignitus*. El retraso es de más de 10 segundos a 11,5 grados C, pero es de menos de cuatro segundos a 24,5.









EJEMPLOS DE MIMETISMO de respuestas de hembras y de señales de competencia de machos efectuados por hembras depredadoras de la especie *Photuris versicolor*, según aparece en estos trazados de registros de campo de fotomultiplicador. El trazado *a* muestra los destellos gemelos que constituyen la señal sexual de las luciérnagas macho de la especie *Photinus macdermotti*, seguidos por un destello único que es la respuesta de la hembra de *P. macdermotti*. En el trazado *b* el autor ha imitado los destellos de los machos mediante una linterna; la respuesta (*derecha*) es la de una hembra de *Photuris versicolor* que imita la respuesta de la hembra de *Photinus macdermotti*. El trazado *c* corresponde a la señal de doble destello de otro macho de *P. macdermotti*, interrumpida por el destello inyectado de un macho rival de la misma especie. En el trazado *d*, la imitación que el autor hace de una señal de *P. macdermotti* es interrumpida por el destello inyectado de una hembra de *Photuris versicolor*, que imita al del macho rival.

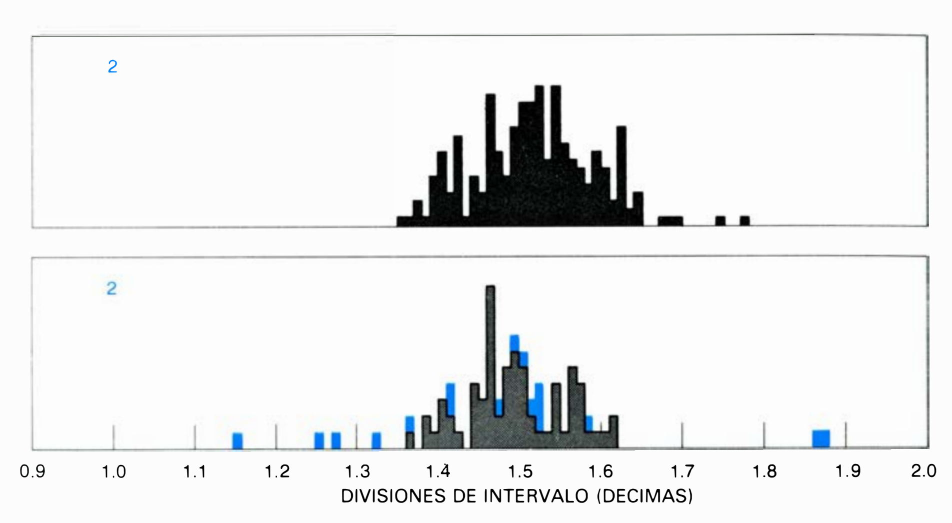
macho de *Photinus macdermotti* se acerca cautelosamente a una hembra que contesta a su llamada. No gira rápidamente para aterrizar a su lado, como haría el macho de *Photinus collustrans*, sino que revolotea y emite destellos varias veces para aterrizar luego a varios centímetros de distancia de la hembra. Esta pauta tan lenta da tiempo a que otros machos de *P. macdermotti* descubran, a su vez, a la hembra, o bien observen la interacción de cortejo e irrumpan en ella. He visto congregarse hasta cinco machos en torno a hembras solitarias de *P. macdermotti*.

Estos competidores recurren a diversas tácticas. La más común es la "inyección" de un destello entre el primero y el segundo de los dos destellos cortos que constituyen la pauta del rival. El destello de la pauta convencional tiene un único pico de intensidad; aunque el destello inyectado puede tener un solo pico, lo común son dos, y, en ocasiones, hasta tres. El competidor suele inyectar estos destellos durante la segunda mitad del intervalo entre los destellos de la pauta de destello del rival, operación en la que pueden hallarse implicadas, por lo menos, tres tácticas distintas.

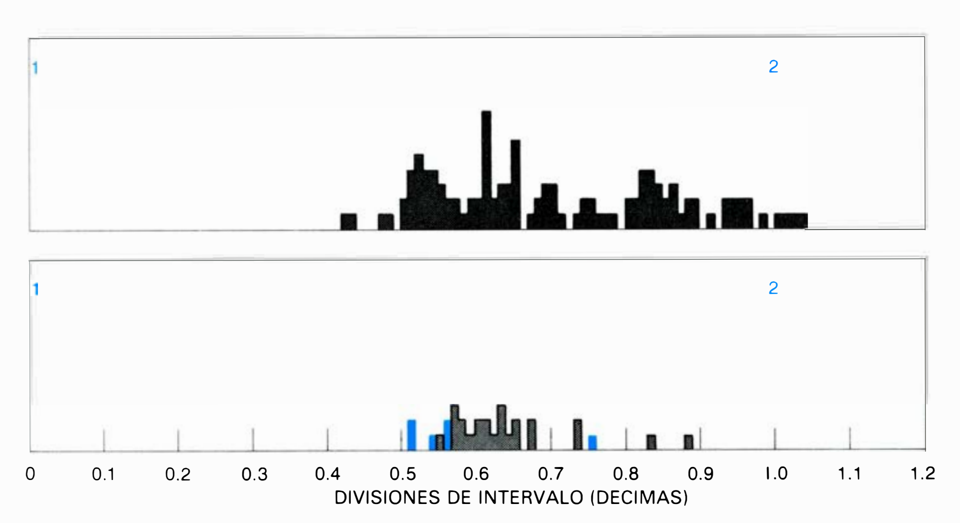
Cuando un competidor inyecta un destello único en el último cuarto del intervalo entre los destellos de la pauta de destello del rival, el efecto, desde el punto de vista de la hembra que lo observa, es un acortamiento del intervalo entre destellos en la pauta del macho. Con frecuencia, la hembra responderá a la pauta de intervalo más breve, y tiene más probabilidades de hacerlo conforme la pauta se va aproximando a la duración "correcta" de dos segundos. Ello proporciona una ventaja al macho que inyecta el destello, porque la hembra dirige normalmente su destello de respuesta hacia el segundo destello de un macho que corteja. Por tanto, el

macho que inyecta el destello puede ver una luz brillante procedente de la hembra, mientras que el macho que emite el destello convencional puede no ver en absoluto la respuesta de la hembra. Así, el macho que emite un segundo destello temprano puede a veces "birlarle" a un rival la respuesta de la hembra.

Es fácil apreciar la ventaja competitiva de tal comportamiento, suponiendo que el macho que inyecta un destello encuentre una pareja y no un verdugo. Sin embargo, lo cierto es que la mayoría de los destellos inyectados son tempranos y no tardíos. Se emiten en el tercer cuarto de la pauta convencional de destello del macho, antes de los destellos inyectados que tienen mayor probabilidad de desencadenar la respuesta de la hembra. ¿Acaso imitan estos destellos, que se inyectan anticipadamente, las pautas de señales más cortas de los machos de una especie de luciérnaga emparentada que a menudo acompaña a *Photinus macdermotti*? En otras palabras, ¿pretende el imitador hacer creer a la hembra que a sólo un destello de distancia se encuentra un macho extraño? La selección natural en el contexto del aislamiento reproductor ha conducido a que las hembras discriminen fuertemente contra las pautas de machos extraños. Nunca conseguí inducir a hembras de *P. macdermotti* a que respondieran las imitaciones que yo hacía de las pautas de especies emparentadas.



MIMETISMO DE LAS HEMBRAS de dos especies de *Photuris*, según se muestra en estos histogramas; el tiempo se mide a lo largo de la abscisa como divisiones del intervalo (de 0 a 1,0) entre los dos destellos gemelos que constituyen la señal sexual de los machos de *Photinus macdermotti*. Ello permite comparar registros efectuados a temperaturas distintas. El histograma de arriba muestra la amplitud de tiempo de la respuesta de 234 hembras de *P. macdermotti* a una señal del macho. La respuesta más rápida llegó poco después de tres décimas de intervalo tras el segundo destello del macho (*número 2 en color*); la más retrasada llegó a poco menos de ocho décimas de un intervalo posterior. La mayoría de las respuestas se situaron a uno y otro lado de medio intervalo. El histograma inferior muestra la amplitud de tiempo de las respuestas miméticas de 85 hembras de *Photuris, P. versicolor* (*gris*) y una especie innominada, "B" (*color*). La mayoría de las respuestas falsas cayeron asimismo a uno y otro lado de medio intervalo.



MIMETISMO DE LOS MACHOS en las mismas dos especies de *Photuris*. Las divisiones en la abscisa (de 0 a 1,0) miden el intervalo entre el primer destello y el segundo (*1 y 2 en color*) de la señal de un macho de *Photinus macdermotti*. El histograma de arriba muestra la amplitud de tiempo de 114 destellos "inyectados" por machos rivales de *P. macdermotti*. Pocos de estos destellos inyectados llegan antes de medio intervalo después del primer destello del macho o con posterioridad a un intervalo completo. El histograma de abajo muestra la amplitud de tiempo de 49 destellos inyectados por hembras de *Photuris, P. versicolor* (*gris*) y una especie innominada, "B" (*color*), al imitar los destellos inyectados por los machos de *Photinus macdermotti*. Ningún destello mimeta cayó fuera de la amplitud de tiempo de los genuinos.

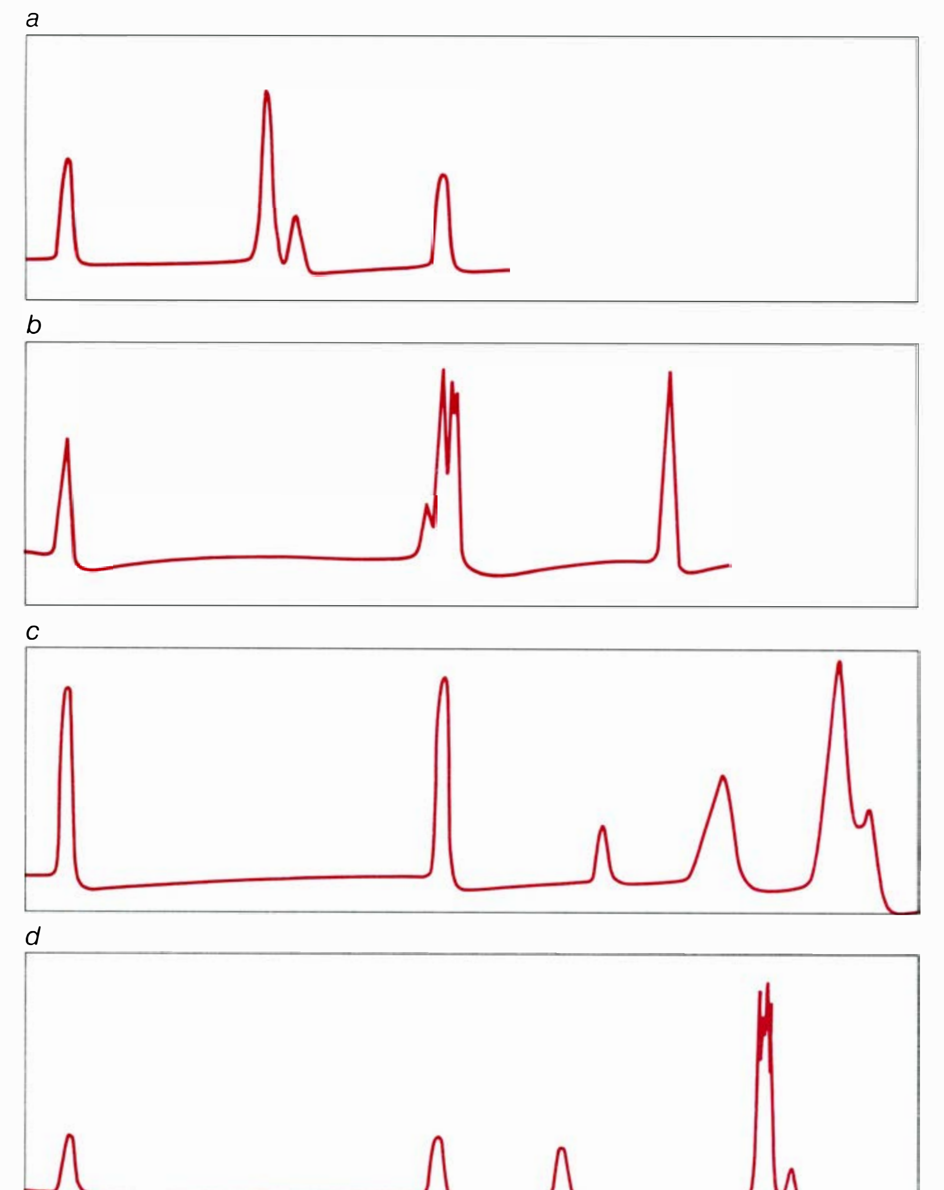
Con el fin de determinar el efecto de los destellos producidos por los machos en las respuestas de las hembras presenté pautas de destellos simuladas a hembras de *P. macdermotti* enjauladas y dispuse machos enjaulados de la misma especie donde pudieran ver el diálogo. A veces los machos inyectaban destellos en mis imitaciones. En otras ocasiones ponía una pantalla entre las jaulas, de modo que las hembras no pudieran ver ninguno de los destellos inyectados. Cuando a las hembras les colocaba la pantalla, contestaban al 98 por ciento de mis simulaciones. Si la pantalla no les impedía la visión, contestaban únicamente al 18 por ciento de las simulaciones que incluían destellos inyectados por los machos enjaulados. Después, empleé dos luces artificiales que simularan la competencia entre un par de machos. Las hembras con pantalla contestaron a un 94 por ciento de las pautas no inyectadas y a un 18 por ciento de las pautas en que se inyectaba el destello a los dos tercios de la duración de la pauta. Pero si inyectaba destellos hacia la mitad de la pauta, las hembras respondían con mayor frecuencia: el 39 por ciento de las veces. El significado de que las hembras se retraigan más en responder al primer tipo de inyección que al segundo, y la manera en que esta diferencia pueda relacionarse con las presiones selectivas pasadas y presentes dentro del contexto del aislamiento reproductor, siguen siendo motivo de conjetura.

Un aspecto de la inyección de destellos se relaciona con las señales miméticas de las hembras depredadoras. Por ejemplo, cuando las hembras depredadoras de *Photuris* imitan a las hembras de *Photinus macdermotti*, suelen responder después del segundo destello del macho. A veces, sin embargo, contestan también después del primer destello. Esta respuesta temprana no es un error; su sincronización es igual a la de un destello inyectado por un macho de *P. macdermotti*. El depredador está imitando simultáneamente a una hembra solicitada y a un macho rival que ya casi la ha conseguido.

Visto de este modo, el significado de los destellos inyectados por el macho de *P. macdermotti* resulta claro. Los machos que inyectan destellos están en realidad imitando a las hembras depredadoras con el fin de retardar aún más

el precavido acercamiento de un rival a una hembra en disputa. Este mimetismo mutuo (es decir, recíproco) se mantiene en la naturaleza porque, al utilizar sus estratagemas respectivas, las *Photuris* depredadoras aumentan su éxito en la adquisición de presas, y los machos de *Photinus macdermotti* aumentan su éxito en aparearse. Las especies se apoyan mutuamente utilizando mimetismos codependientes y continuados. Pero, ¿cuál es la explicación de que las hembras de *P. macdermotti* se retraigan de forma diversa en su respuesta a los destellos inyectados? Podría hallarse en el hecho de que también las hembras corren el peligro de ser depredadas por las hembras de *Photuris*. Si responden con poca frecuencia tanto a los destellos inyectados por los machos de su propia especie como a los destellos de imitación inyectados por las hembras depredadoras, el riesgo disminuye.

Experimentos con destellos simulados han demostrado otras formas de rivalidad y engaño sexuales en *Photinus macdermotti*. Así, los machos que compiten no sólo inyectan destellos, sino que emiten destellos sincrónicamente con el segundo destello de la pauta de su oponente. Se observa este sincronismo en muchas especies de luciérnagas, probablemente siempre dentro del contexto de competencia por una pareja. Los machos de *P. macdermotti* mimetizan asimismo los destellos de las hembras. Emiten destellos suplementarios después del destello de respuesta de la hembra, destellos inyectados dobles y triples y distintas combinaciones de todas estas emisiones. No obstante, el destello inyectado único es, con mucho, la más común de las tácticas empleadas por el macho.



VARIEDAD DE LA COMPETENCIA entre machos rivales de *Photinus macdermotti*, según se muestra en estos trazados de lecturas de fotomultiplicador. Empleando una linterna, el autor imitó los dobles destellos de la señal sexual de los machos de esta especie en presencia de machos y de hembras. En el trazado *a*, el destello inyectado de un macho competidor se advierte en el pulso de doble pico (sobrecarga) a medio camino entre los destellos gemelos; se trata de un típico destello inyectado. En *b*, el competidor sincronizó su destello inyectado con el segundo destello del autor, produciendo un pulso desigual (sobrecarga); el destello de la derecha es la respuesta de la hembra. En *c*, el competidor no inyectó los dos destellos largos de la derecha hasta que la señal del autor hubo desencadenado una respuesta por parte de una hembra. En *d*, el competidor demoró asimismo su destello único, un pulso de dos picos similar al trazado *a*.

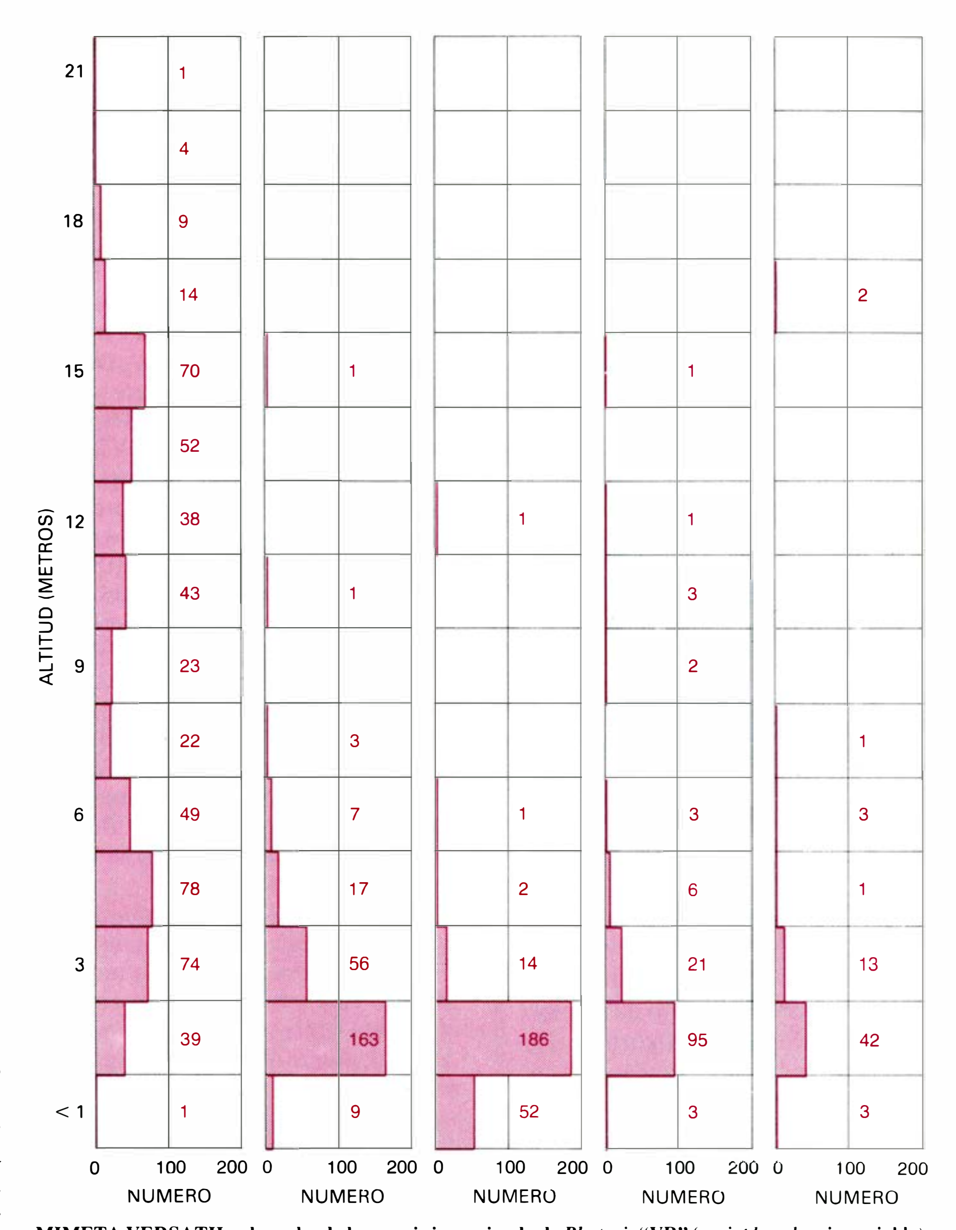
Las hembras de *Photuris* han imitado las señales de sus presas durante millones de generaciones. Su sintonía de señales múltiples es notable, pero representa sólo un aspecto de esas relaciones forzadas y dinámicas. Las señales de apareamiento de las especies presa tienen que haber cambiado y deben haberse esquivado repetidamente por mor de las presiones ejercidas por los mimetas depredadores. De hecho, las influencias más importantes sobre las señales de las luciérnagas del Nuevo Mundo han sido probablemente las acciones de atracción de presas de las hembras de *Photuris*. Podría argumentarse razonablemente que, si este género existiera en Asia, pronto eliminaría a los sedentarios enjambres de apareamiento de las luciérnagas asiáticas, como ciertas luciolas de Tailandia que emiten destellos al unísono. Algunas especies de luciérnagas del Nuevo Mundo pudieron haber tenido protocolos de apareamiento similares en cuanto a sincronización antes de la aparición de *Photuris*. Después de ello, se habrían convertido en presa fácil, y pronto habrían desaparecido.

Evidentemente, los machos presa pueden apreciar ciertos indicios que les permiten detectar a los depredadores. En mis salidas a los prados de luciérnagas he aprendido que los machos de *Photinus collustrans* recibían contestación de cinco veces más hembras depredadoras que de hembras de su propia especie, y aun así, ni un solo macho cayó en la trampa. Por término medio, un macho de *P. collustrans* empleaba sólo 42 segundos en alcanzar y aparearse con una hembra de su propia especie, desde el instante en que la avistaba por primera vez. Sin embargo, ninguno de los 11 machos a los que hembras de *Photuris* enviaron señales se aproximó lo bastante para ser capturado. ¿Qué tipo de pista puso al descubierto a las depredadoras? ¿Fueron éstas, a su vez, víctimas de una prueba de seguridad impuesta por los machos?

Es probable que los machos respondan a la intensidad de los destellos de

respuesta, y, cierto, que responden a la forma y sincronización de los destellos de las hembras. Si la claridad de la hora lo permite, también pueden ver al propio insecto que contesta. Una hembra de *Photuris* en situación de caza, si es visible, se distingue fácilmente de una presunta pareja de *Photinus*, por su tamaño, forma y aspecto. ¿Podría ser ésta la razón por la que la mayoría de los machos de *Photinus* vuelan durante el crepúsculo? (No hay pruebas de que se discriminen los colores de los destellos, aunque la luminiscencia de las especies de *Photuris* es por lo general verde y, amarilla, la de la mayoría de especies de *Photinus* y *Pyractomena*.)

Las señales de apareamiento de algunas de las luciérnagas que depredan las hembras de *Photuris* pueden haberse refinado hasta el engaño, incorporando trucos que hacen que los depredadores imiten toscamente sus falsas respuestas. Un patrón simple de evolución de tales contramedidas permitiría evadirse del rastreo de señales de *Photuris*, porque el depredador explota simultáneamente a otras especies con un código similar. Una hembra de *Photuris* podría ser incapaz de coevolucionar con una especie presa que cambiara gradualmente su código, debido al "lastre" ejercido por la continua sintonización del depredador con otras especies y con su dependencia alimentaria de las mismas. O bien, si la sincronización de las falsas respuestas del depredador empezara con el inicio del destello de su víctima, una especie presa que cambiara su ritmo de respuesta desde el inicio del destello hasta su finalización podría hacer que los impostores se retrasaran, quedando en evidencia. De ahí que las demoras en los destellos de un mimeta que responde puedan variar de forma predecible, porque la especie presa modificará, por ejemplo, la longitud de sus destellos, mientras que los de las hembras de la misma especie permanecerían constantes.



MIMETA VERSATIL, el macho de la especie innominada de *Photuris* "VR" (*variable red*, rojo variable); suele volar a una altura de 3 a 15 metros sobre el suelo al tiempo que emite su señal sexual pulsante. La columna de la izquierda muestra la altitud de 517 luciérnagas "VR" que emiten señales pulsantes. Sin embargo, la pauta de vuelo de los machos cambia bastante y su señal se convierte en una titilación en presencia de *Pyractomena barberi*, una luciérnaga que vuela bajo y que tiene una señal titilante. La segunda columna muestra la altitud de 257 luciérnagas "VR" titilantes; la tercera refleja la altitud de 256 machos de *P. barberi*. Cuando hay machos de *Pyractomena angustata*, que vuelan bajo y emiten un resplandor, las luciérnagas "VR" también emiten un resplandor y vuelan bajo. La cuarta muestra la altitud de 135 machos "VR" resplandecientes; la última, la altitud de 65 luciérnagas de *P. angustata*.

Otro código detector de depredadores que es verosímil incorpora dos tipos de pulso en una pauta de un solo destello. Por ejemplo, en Jamaica, donde las hembras de *Photuris jamaicensis* son depredadores versátiles que comen a otras varias especies de luciérnagas, una especie presa del género *Photinus* emite de dos a seis destellos y luego titila. Los destellos preliminares, debido a su semejanza con las pautas de otras especies presa, pueden estimular la emisión de respuestas precipitadas por parte de las hembras de *Photuris jamaicensis*. Las alternativas de destellos macho-hembra que tienen lugar durante la competencia por el apareamiento en *Photinus macdermotti* pueden también tener el significado de seña-contraseña.

El género *Photuris* ha tenido fama de presentar dificultades de clasificación, si no de resistirse totalmente al encuadramiento taxonómico. La razón estriba en que sus desconcertantes variaciones morfológicas hacen que separar los distintos miembros del género en "especies de gabinete" satisfactorias sea una tarea desesperante. En 1951, sin embargo, y a partir de estudios realizados casi 30 años antes, se publicaron póstumamente las descripciones de las pautas de destellos del género, específicas a nivel de especie, que habían sido compiladas por H. S. Barber, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Barber proponía numerosas especies nuevas de *Photuris*. Siguiendo su ejemplo, he encontrado asimismo nuevas especies en el género *Photinus*, comparativamente simple y bien conocido, mediante el análisis de sus señales de apareamiento. Como resultado de los estudios de Barber y de otros, los investigadores de las luciérnagas han llegado a una regla general: un hábitat, una época, una señal, una especie. Para utilizar el lenguaje de la física, dos especies de luciérnagas que orbiten en el mismo hábitat al mismo

tiempo deben tener distinto "spin" de señales.

Las luciérnagas del género *Photuris* incumplen esta regla de forma espectacular. No sólo emiten las hembras carnívoras pautas parecidas a las de otras especies de luciérnagas que comparten con ellas sus hábitats, sino que también los machos son mimetas. Por ejemplo, en el noroeste de la península de Florida, tres especies excepcionales de luciérnagas comparten los fríos atardeceres de comienzos de primavera, los pinares y las praderas y sus señales sexuales. Los machos de *Photuris* "VR" (*variable red*, rojo variable) vuelan a altitudes elevadas, en particular alrededor de las copas de los pinos, emitiendo su lenta pauta pulsante. Los machos de *Pyractomena barberi* vuelan cerca del suelo, emitiendo su titilación irregular. Los machos de *Pyractomena angustata* vuelan por lo general con *P. barberi* o un poco más alto, emitiendo su propio resplandor, de larga duración. Sin embargo, cuando los machos de *Photuris* "VR" descienden al espacio aéreo de *Pyractomena angustata* y *P. Barberi*, cambian sus señales y empiezan a lucir como las otras especies.

Que la señal de *P. angustata* sea un resplandor y no un destello es un hecho a destacar por sí mismo. Las luciérnagas que resplandecen pertenecen casi invariablemente a géneros primitivos, desde el punto de vista del comportamiento, y todos los congéneres de *P. angustata* son emisores de destellos o de titilaciones etológicamente avanzados. Junto a esta insólita circunstancia, llama la atención que *Photuris* "VR", el vástago de otra estirpe de emisores de destellos, pueda resplandecer como *Pyractomena angustata* y titilar como *P. barberi* y se libre al mimetismo de ambas especies no sólo en la arena de actividad de *Pyractomena*, sino sincrónicamente con estas otras especies. Hay algo más que mera coincidencia.

Los machos de otras especies de *Photuris* se entregan a mimetismos similares. *Photuris* "AR" (*Apalachicola red*, rojo apalachícola) señala normalmente con destellos únicos en las copas de los pinos, pero resplandece como *Pyractomena angustata* cuando dicha especie está presente. Una vez ha pasado la estación de *P. angustata* o cuando *Photuris* "AR" vuela fuera del área de *Pyractomena angustata*, la especie de *Photuris* ya no resplandece.

La especie más notable por su versatilidad es quizá *Photuris cinctipennis*. Aunque los estudios al respecto no han llegado a su etapa final, parece que el macho de esta especie, además de emitir su propia pauta de señales, espectacular y única (que toma la forma de cadenas de *crescendos* en rápida arremetida), puede emitir otras cuatro pautas de señales.

¿Qué pudo originar esta convergencia evolutiva? Como Barber escribió cuando empezó a sospechar (correctamente) que los machos de *Photuris lucicrescens* podían emitir largos *crescendos* o bien destellos cortos: "Distintas respuestas satisfarían a diversas personas, pero nadie lo sabe". Los estudiosos de la coloración advertidora pueden aducir una explicación similar para la convergencia. Los que se ocupan de la propagación de señales dirían que determinadas formas de señales se propagan más fácilmente en ciertos hábitats.

Quizá la respuesta resida en el hecho de que, en un momento dado, los machos de *Photuris* son mucho más numerosos que las hembras sexualmente activas de su propia especie y compiten vigorosamente para obtener pareja. Sospecho que, en la mayoría de los casos, los machos que imitan las señales se hallan cazando sus propias hembras, mientras que las hembras se dedican, al mismo tiempo, a depredar a las luciérnagas que los machos de *Photuris* mimetizando. En breve: los depredadores se han convertido en la presa, aunque la motivación de los machos sea el sexo y no el alimento.

Sin embargo, la hembra de *Photuris* es mayor y más poderosa que el macho. ¿Qué puede hacer éste para aparearse con un depredador tan formidable? Mi opinión es que, en algunas especies, como *Photuris* "VR", cuando un macho ha localizado a una hembra al acecho, puede hacer, a veces, que el interés de la hembra se desplace del alimento al apareamiento. En efecto, los machos "seducen" a la hembra al precipitar un cambio en el comportamiento que hubiera acabado por producirse. En varias ocasiones he observado que cuando un macho "VR" titilante o resplandeciente toma tierra cerca de una luz que está emitiendo destellos desde el suelo, emite su propia pauta de señales, característica de la especie y propia de las copas de los árboles. Ello corresponde a un proceso de seducción más que a uno de violación. Ya sea esta explicación, o cualquier otra, la que finalmente se demuestre correcta, hay un hecho claro. Las interacciones de las luciérnagas americanas son mucho más complejas de lo que nadie podía haber anticipado. ¿Se trata acaso de una peculiaridad de las luciérnagas u ocurre también que las interacciones de otros insectos encierran pareja complejidad?

El potasio y el sodio en las células vivas

El potasio es el catión más abundante en las células vivas, en tanto que el sodio lo es en los biotopos. Ambos cationes están implicados en complejos mecanismos de transporte

A. Rodríguez Navarro

El sodio es el ion dotado de carga positiva (catión) más abundante en la mayoría de los biotopos. En muchos casos, sobrepasa varias veces la abundancia o concentración de potasio. En la composición media de la corteza terrestre, las cantidades de sodio y potasio son parecidas. Ahora bien, debido a que los minerales sódicos sufren una descomposición más rápida que los potásicos, la solución resultante de la meteorización de las rocas es más rica en sodio que en potasio. A este factor hay que añadir que el potasio es fijado más fuertemente por las arcillas y acumulado preferentemente por los organismos vivos. En virtud de este proceso, el sodio es arrastrado a los mares, donde se acumula en grandes cantidades. La evaporación del agua de los mares y los factores que han intervenido en la formación de los suelos han originado así ambientes muy diversos para la vida, en punto a concentraciones de potasio y sodio.

En contraposición a la diversidad de los biotopos definidos en función de las concentraciones de potasio y sodio que muestran, las células de los organismos vivos presentan una gran homogeneidad: contienen, casi exclusivamente, potasio, y a una concentración bastante más elevada que la del medio externo [*véase la tabla de la página 75*]. Son excepción a esta regla algunos organismos que viven en ambientes de alta salinidad sódica. En presencia de altas concentraciones de sales externas, la supervivencia de un organismo depende de su capacidad para mantener en sus células una solución más concentrada que la del medio circundante. Sólo cuando el medio interior es más concentrado, el agua pasará del exterior al interior y las células podrán crecer. A fin de mantener una elevada concentración de solutos, los organismos que viven en biotopos de alta salinidad acumulan cloruro de sodio, aunque en todos los casos las células concentran fuertemente el potasio del medio.

Se ha discutido mucho en torno a la función del potasio en las células de los seres vivos. El requerimiento de potasio por parte de algunos enzimas hizo pensar inicialmente en que las necesidades de potasio podrían obedecer a una exigencia para la actividad de esas proteínas. Sin embargo, la función enzimática del potasio podría ser secundaria y desarrollada durante la evolución, precisamente por la abundancia de potasio y por su dinámica durante el crecimiento de la célula.

En relación con los cationes celulares, un hecho indiscutible es su papel como neutralizadores de las cargas de los aniones (iones portadores de carga negativa). Las cargas negativas de los aniones pueden ser neutralizadas por protones, pero anión y protón pueden reaccionar para dar una molécula sin carga, un ácido. La cantidad resultante de protones libres dependerá de las características del anión y nos definirá la acidez del sistema. La concentración de protones en el agua pura es 10^{-7} molar (pH = 7), y la de los líquidos celulares muy próxima. La célula contiene gran cantidad de aniones de ácidos orgánicos y de ésteres de ácido fosfórico, para que el protón neutralizara estos aniones la concentración del protón debería ser 10^{-2} (pH = 2) aproximadamente. Pero no ocurre tal. En los organismos vivos de nuestro planeta el catión potasio es el que neutraliza eléctricamente estas cargas, aunque el sodio puede contribuir significativamente en algunos casos en que existe una fuerte deficiencia de potasio.

La abundancia de potasio en la célula ha condicionado probablemente la evolución de muchos sistemas fisiológicos, quedando implicado el potasio en la regulación de importantes procesos celulares. Por ejemplo, el ribosoma contiene una gran cantidad de ácido ribonucleico, cuyos restos de fosfato están neutralizados por potasio. Si se sustituye el potasio del ribosoma por sodio, la estructura del ribosoma resultará afectada, debido a que los dos cationes no son iguales, y alterada, consecuentemente, la síntesis de proteínas. En el caso de una sustitución extensa, la síntesis de proteína se detendrá totalmente, según pudo comprobarse hace ya muchos años en mutantes de *Escherichia coli* que eran incapaces de retener el potasio cuando se suspendían en un medio con sodio y sin potasio. Pero si la sustitución de potasio es sólo parcial, la síntesis no se detendrá totalmente, y en este hecho se basa el mecanismo de actuación de algunos virus. Cuando un virus infecta a una célula, se altera el metabolismo normal, dirigiendo entonces el virus algunas de las funciones metabólicas. Uno de los primeros acontecimientos después de la infección vírica es la inserción, en la membrana celular, de unas proteínas especiales de la cápside del virus que modifican los flujos de cationes, afectando a las concentraciones internas de potasio y sodio. A los nuevos niveles de estos cationes, la síntesis de las proteínas del virus está favorecida frente a la síntesis de las proteínas de la propia célula.

Además de neutralizar las cargas negativas de la célula y regular la función enzimática, el potasio actúa como soluto implicado en la regulación osmótica en algunos organismos. Obviamente, el alto contenido en potasio hace que el catión contribuya de un modo significativo en el establecimiento del potencial osmótico de cualquier célula; además, algunas bacterias poseen la capacidad

de variar el contenido en potasio, en respuesta a la exposición a medios de baja actividad de agua. Así, cuando la bacteria crece en un medio con baja actividad de agua se promueve la acumulación de potasio en mayor extensión que cuando crece en medios diluidos, favoreciendo el paso del agua hacia el interior de la célula.

La función del sodio en las células vivas y los requerimientos de sodio son más complejos que los de potasio. En general, puede decirse que el sodio no es indispensable para la célula, aunque puede reemplazar y suplir parcialmente las funciones del potasio. Sin embargo, la abundancia de sodio en muchos biotopos ha determinado que este catión quedara implicado en numerosos procesos de transporte, como luego veremos. Hay que tener presente que los animales con circulación cerrada (es decir, dotados de una red de vasos) mantienen en sus líquidos extracelulares una alta concentración de sodio, y que sus células se encuentran en condiciones similares a aquellas que viven en biotopos con alto contenido en ese mismo catión.

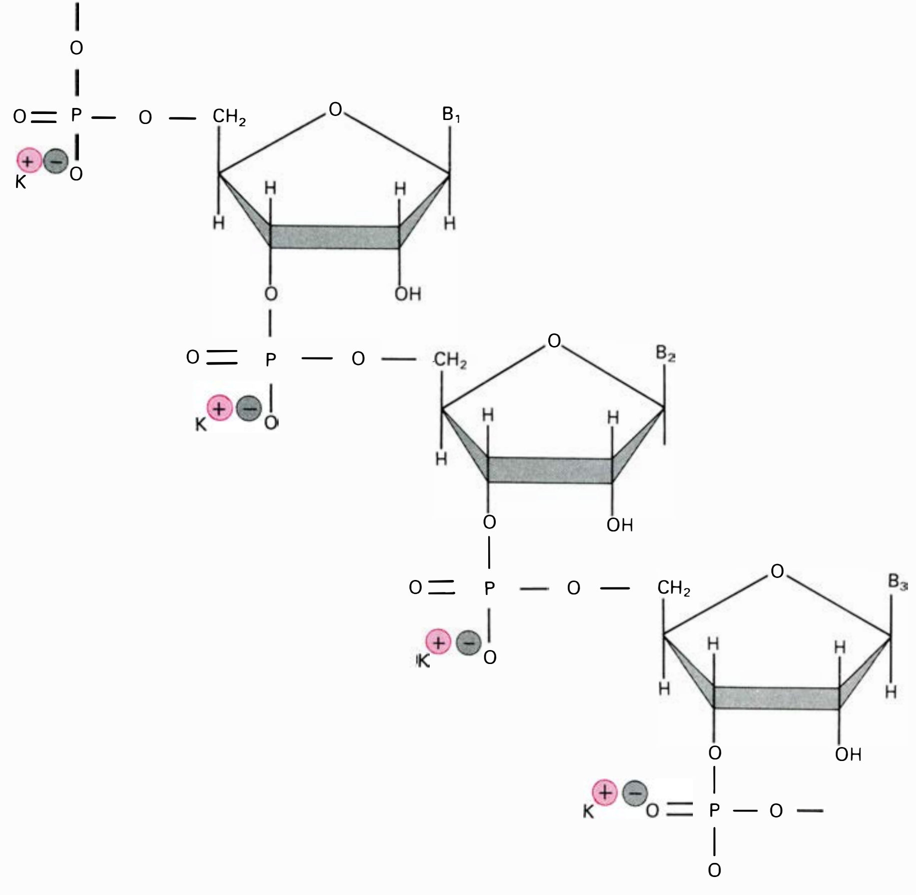
La universalidad de la tendencia a concentrar potasio, que alcanza a todas las células de los organismos vivos, no se cumple en lo relativo a los mecanismos que realizan esa función. No conocemos todavía con precisión los mecanismos que, a lo largo de la evolución, se han diferenciado para la acumulación de potasio. Se admiten, no obstante, tres mecanismos básicos que, en general, corresponden a los de las bacterias, los vegetales y los animales.

Al igual que la mayoría de los organismos unicelulares que viven en medios muy diluidos y con marcada diferencia de las células animales, las bacterias tienen una gran impermeabilidad pasiva y están dotadas de mecanismos que les permiten concentrar el potasio varias decenas de veces. La primera especie en la que se establecieron con claridad los mecanismos de los transportes de potasio y sodio fue *Streptococcus faecalis*, una bacteria láctica que no respira y que obtiene toda la energía para su metabolismo a partir de la fermentación de la glucosa a ácido láctico. La incapacidad de respirar distingue a *S. faecalis* de otras bacterias en cuyas membranas celulares se asienta un sistema respiratorio que, durante la oxidación del sustrato, expulsa protones al exterior de la misma [véase "Cómo fabrican ATP las células", por P. C. Hinkle y R. E. MacCarty, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo, 1978]. En *S. faecalis* la energía para concentrar al potasio procede del ATP (trifosfato de adenosina) obtenido en la fermentación; se trata, empero, de un proceso secundario, pues el primer paso para la acumulación es la extracción de protones. En la membrana de *S. faecalis* existe un enzima de relativa complejidad que, al consumir ATP, excreta protones al exterior de la misma. La actividad característica de este enzima cuando se obtiene en tubo de ensayo es la hidrólisis del ATP, por lo que se la conoce por el nombre de ATPasa [véase "Mecanismo molecular de la transducción de energía", por Emilio Muñoz y J. Manuel Andreu, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero, 1979].

La extracción de protones por la ATPasa genera un potencial eléctrico negativo en el interior de la célula, que atrae hacia dentro cualquier compuesto con una carga positiva neta. Es necesario tener presente que, dada la magnitud de una bacteria y la capacitancia de la membrana, el movimiento de un número muy reducido de protones genera un potencial eléctrico elevado. En respuesta al potencial eléctrico, el potasio se mueve hacia el interior de la bacteria, pues en la membrana existe un transportador que reconoce al potasio y le franquea el paso a través de la misma. La entrada del potasio permite más salida de protones hasta satisfacer las necesidades de la bacteria. En el caso de una concentración muy baja de potasio en el exterior, el ion se acumulará por difusión desde el exterior hasta que el potencial eléctrico correspondiente a su distribución iguale el potencial eléctrico máximo que puede obtenerse con la ATPasa.

El proceso de acumulación de potasio en las bacterias que respiran es semejante al expuesto para *S. faecalis*, siendo la única diferencia el origen del potencial eléctrico. Como mencioné antes, en el proceso de la respiración se extraen protones hacia el exterior de la membrana, generando este proceso un potencial eléctrico, utilizado para la síntesis de ATP, el transporte y otros procesos. La atracción de la carga eléctrica negativa sobre el protón determina que éste se mueva hacia el interior de la célula a través de la ATPasa, lo que genera ATP. Simultáneamente, la atracción de la carga eléctrica sobre el potasio determina su acumulación.

El esquema hasta ahora presentado para el transporte del potasio en bacte-



NEUTRALIZACION DE LAS CARGAS del ARN por potasio. Al *p*H fisiológico los grupos fosfato del ácido nucleico están en forma de aniones y la neutralidad eléctrica exige la presencia de un catión. Si las cargas eléctricas se neutralizaran con protones el *p*H celular sería aproximadamente 2. En las células hay otros muchos aniones que están neutralizados por potasio. (B_1, B_2 y B_3 son las bases del ácido nucleico.)

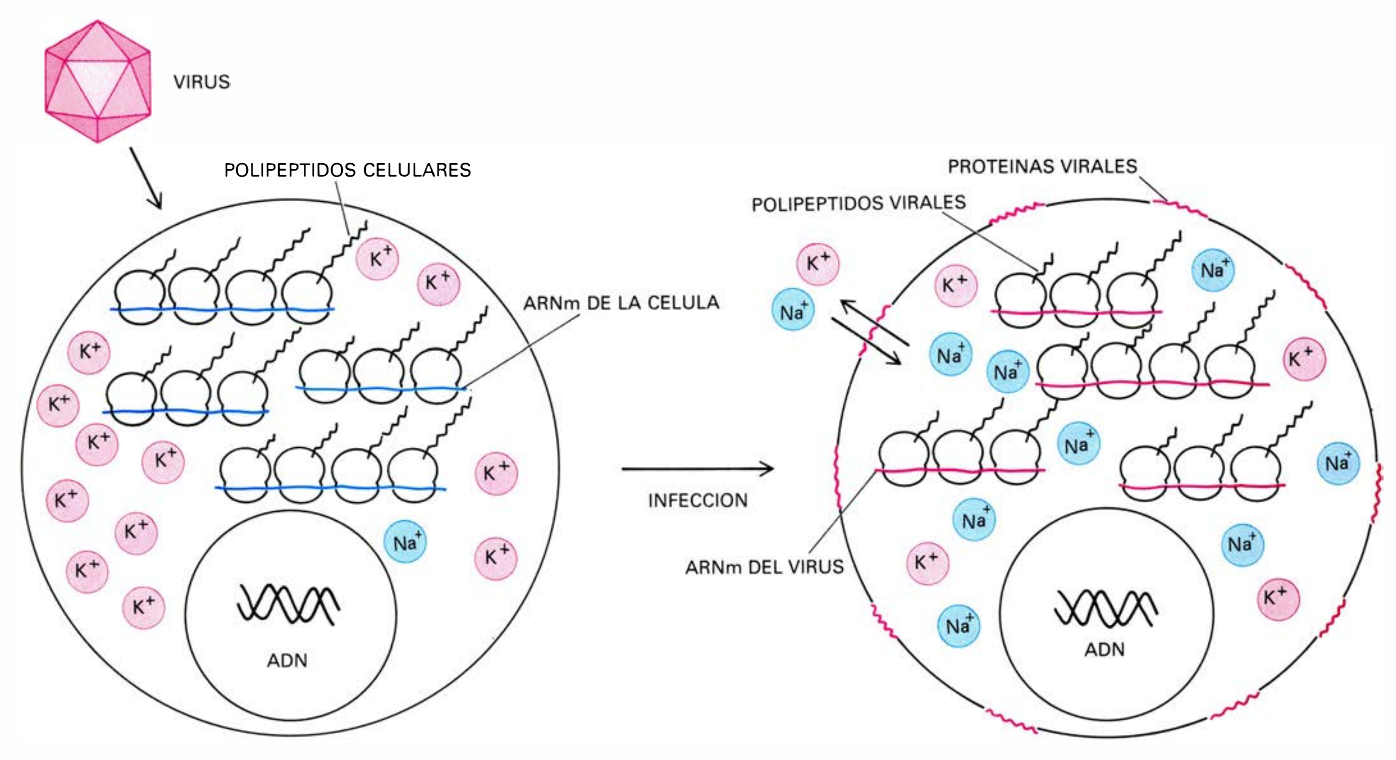
rias constituye sólo una parte de una realidad mucho más compleja que aún no se conoce con detalle. En *Escherichia coli*, bacteria que ha sido utilizada con gran intensidad como modelo biológico, se han aislado numerosos mutantes para el transporte de potasio. Estos mutantes han permitido establecer la existencia de dos sistemas distintos para su transporte: el Kdp y el TrKA. El sistema Kdp tiene una gran capacidad para acumular potasio, permitiendo a la bacteria crecer en concentraciones extraordinariamente bajas de potasio (10^{-6} molar). El sistema TrKA tiene mucha menos afinidad por el potasio que el sistema Kdp, pero es muy efectivo a concentraciones de potasio en el orden milimolar. Estos dos sistemas corresponden a mecanismos completamente diferentes: mientras el sistema TrKA promueve la acumulación del potasio en respuesta al potencial eléctrico, el sistema Kdp actúa de una forma singular, pues obtiene la energía directamente del ATP, hidrolizando este compuesto para promover la acumulación del potasio. Este sistema en tubo de ensayo tiene la capacidad de hidrolizar ATP, por lo que también es una ATPasa. Aunque se desconoce la forma en que el sistema Kdp transporta el potasio, existe la posibilidad de que algún anión o catión sea transportado simultáneamente, en el mismo sentido o en sentido contrario, ignorándose por tanto el valor de la carga neta movida.

En las células de los hongos y de las plantas, los mecanismos implicados en la acumulación de potasio no están tan caracterizados como en las bacterias, ni completamente confirmados los procesos propuestos. La información más importante se ha obtenido con hongos, fundamentalmente *Neurospora crassa* y *Saccharomyces crevisiae*. Sin embargo, hay numerosas pruebas a favor de la existencia de mecanismos comunes con las células de los vegetales superiores.

En común con lo descrito para las bacterias, las células vegetales también mantienen un potencial eléctrico, negativo en el interior de la célula. El punto más conflictivo se centra sobre el mecanismo mediante el cual se genera este potencial, aunque gran número de datos indican que una ATPasa existente en la membrana bombea protones al exterior, como sucede en las bacterias. Hay que hacer notar que esta ATPasa no es la misma que la ATPasa bacteriana, de la que se diferencia netamente por sus propiedades bioquímicas.

Se ha mencionado antes que la vida se desarrolla sobre medios en los que existe sodio, incluso en concentraciones considerablemente más altas que las de potasio. La existencia de un potencial eléctrico como origen inmediato de la acumulación del potasio indica claramente que el sodio también será atraído al interior de la célula. Aun suponiendo una baja permeabilidad al sodio, y una gran capacidad de discriminación del transportador del potasio frente al sodio, la acumulación de éste sería indefectible. La mayor o menor permeabilidad sólo sería un factor cinético que retrasaría más o menos el correspondiente equilibrio termodinámico. Desde un punto de vista teórico, la única vía para que no se acumule sodio es la existencia de mecanismos especiales para su extracción. La extracción del sodio, simultáneamente con su entrada, impediría que se alcanzase el equilibrio termodinámico, estableciéndose antes un equilibrio cinético entre la entrada y la salida.

La necesidad teórica de mecanismos encargados de la extracción del sodio ha recibido confirmación experimental en algunas bacterias, encontrándose los mecanismos implicados en la extracción de este catión. En todos los casos estudiados, la extracción del sodio ocurre por un mecanismo que introduce protones a la vez que saca aquél. El movimiento de los dos cationes tiene lugar simultáneamente, y no puede darse uno de ellos por separado. El transporte que tiene lugar de esta forma se denomina antiporte, y antiportador, el sistema de la membrana que lo realiza. Desde un punto de vista energético, el movimiento del sodio con el protón hace que, en la salida del sodio, haya que considerar simultáneamente el potencial electroquímico de los dos cationes. Si la estequiometría del pro-

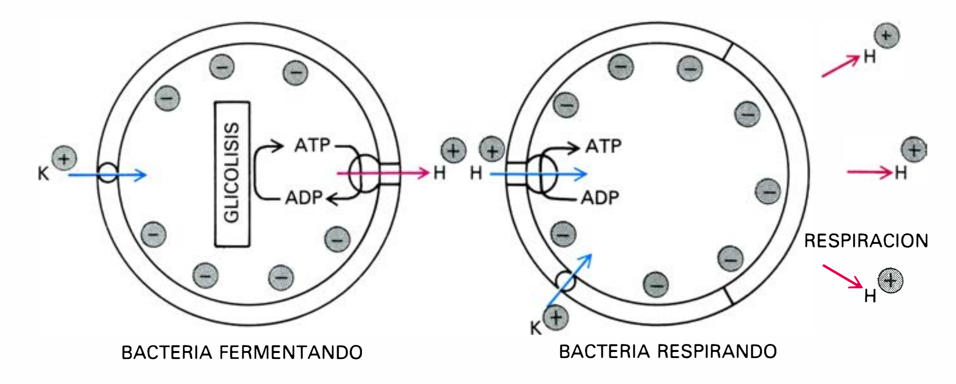


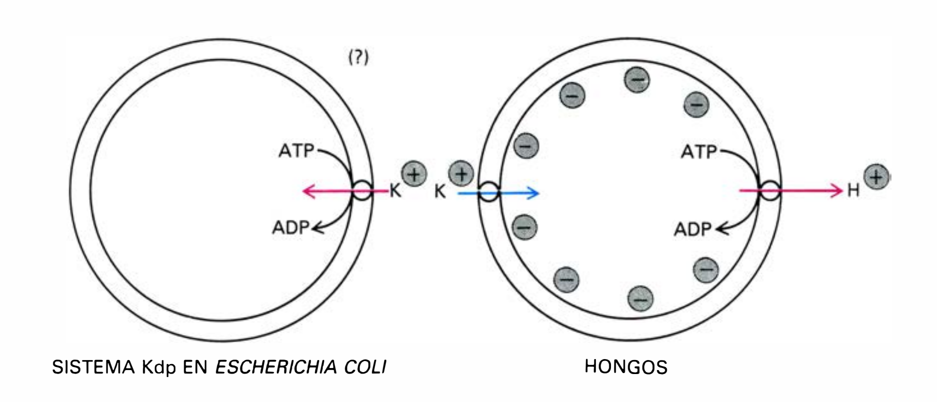
REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL MODELO de actuación de los virus que permeabilizan la membrana de las células huésped. La inserción de ciertas proteínas del virus en la membrana de la célula hacen a ésta más permeable, lo que produce un cambio en la composición iónica de la célula. En las condiciones de esa forma establecidas, la síntesis de proteínas del virus se ve favorecida frente a la correspondiente síntesis de proteínas celulares.

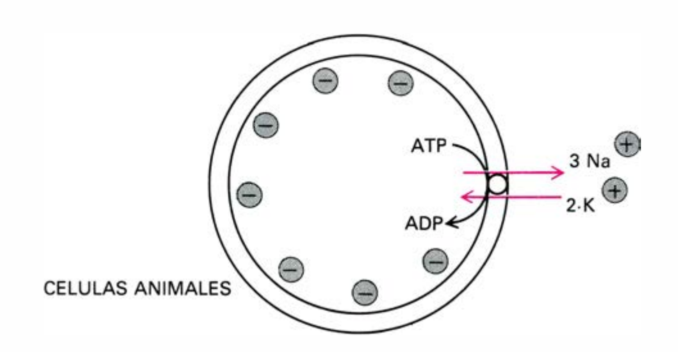
ceso es uno a uno, no se mueve ninguna carga neta; por tanto, el proceso será independiente del potencial eléctrico y el sodio podrá salir en contra de una mayor concentración del mismo en el exterior celular si el pH exterior es inferior al del interior. En este caso, el potencial del protón para entrar arrastraría el sodio hacia fuera y, en el equilibrio, el cociente de las concentraciones dentro y fuera de los dos cationes sería inverso. Cuando la estequiometría del proceso es mayor de uno, esto es, cuando penetra en el interior de la célula más de un protón por cada sodio que sale, la salida del sodio estará también ayudada por el potencial eléctrico de la célula. El potencial eléctrico, al arrastrar hasta el interior el exceso de carga positiva del protón, extrae el sodio. Evidentemente, en este último caso la extracción del sodio será efectiva aun cuando la concentración de protones no sea mayor en el exterior que en el interior. No se sabe a ciencia cierta cuál es la estequiometría del proceso de extracción de sodio en *E. coli*. Podría ser, incluso, variable: uno a uno (1:1), cuando el medio exterior es ácido, y mayor que uno cuando es alcalino.

En las células animales, la acumulación de potasio y la extracción del sodio tiene lugar mediante un proceso completamente diferente de los descritos. No hay en ellas movimiento de protones, y los movimientos de potasio y sodio se realizan simultáneamente por una bomba que consume directamente ATP. Esta ATPasa se estimula con potasio y con sodio, por cuya razón se denomina ATPasa ($Na^+ + K^+$).

El mecanismo de actuación de la bomba de potasio y sodio en las células animales es también un proceso de antiporte; cada ATP consumido supone la salida de tres sodios y la entrada de dos potasios. El resultado, además del movimiento de los cationes, es la creación de un potencial eléctrico, negativo en el interior de la célula. Debido a la permeabilidad de las células animales a los cationes, se establece un flujo continuo de entrada y salida de sodio y potasio, que determina los niveles celulares de los cationes. En condiciones de equilibrio, la ATPasa bombea el sodio y el potasio en contra de sus correspondientes potenciales electroquímicos, en tanto que ambos cationes se difunden pasivamente en sentido contrario. Podemos diferenciar esos flujos mediante el uso de algunas drogas, por ejemplo, el esteroide cardiotónico ouabaina, utilizado por algunas tribus africanas para envenenar flechas; la droga inhibe la





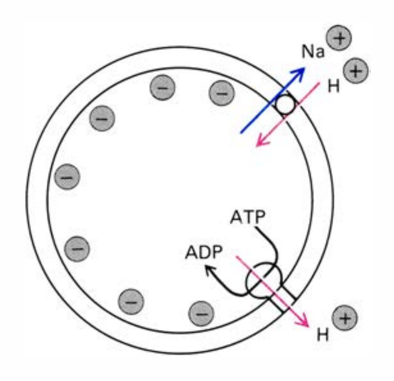


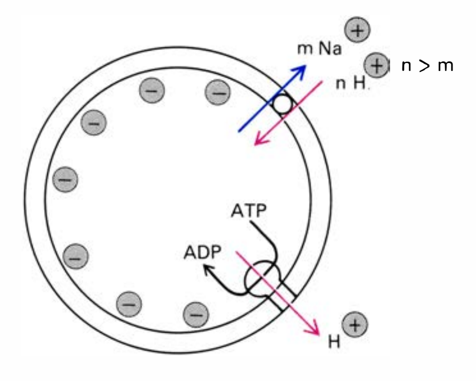
MECANISMOS DE ACUMULACION DE POTASIO. En las bacterias fermentativas, la ATPasa extrae protones consumiendo el ATP producido en la glicolisis; el potencial eléctrico creado por la extracción de los protones arrastra el potasio al interior de la célula. Cuando respiran, las bacterias sacan protones hasta el exterior de la membrana; este proceso crea un potencial eléctrico que atrae las cargas positivas al interior. En respuesta a dicho potencial, se acumula el potasio. También entran los protones a través de la ATPasa, sintetizándose ATP. El sistema Kdp de *Escherichia coli* es una ATPasa que bombea potasio a expensas de la energía obtenida con la hidrólisis del ATP, pero se desconoce si la neutralidad eléctrica se logra transportando simultáneamente un anión, extrayendo un catión o mediante el concurso de otros transportadores. En hongos se supone que existe una ATPasa que extrae protones consumiendo ATP y creando, como en las bacterias fermentativas, un potencial eléctrico que arrastra el potasio al interior. En los animales existe un único sistema que acumula potasio simultáneamente con la extracción de sodio, obteniendo la energía de la hidrólisis del ATP. La ATPasa implicada se conoce por ATPasa ($Na^+ + K^+$).

actuación de la bomba sin afectar los flujos pasivos, destruyendo el equilibrio natural de los cationes en la célula.

La incorporación de la ATPasa ($Na^+ + K^+$) en vesículas de fosfolípidos ha permitido conocer con detalle la colocación del enzima en la membrana. La ATPasa se extiende de un lado al otro de la misma con una orientación determinada. Por ejemplo, la ouabaina inhibe sólo desde la cara exterior de la membrana, en tanto que el ATP se une al enzima por la cara interna.

La ATPasa ($Na^+ + K^+$) no tiene ninguna relación con la ATPasa bacteriana, de la que se distingue fácilmente en razón de sus propiedades bioquímicas. Su posible relación con la ATPasa de hongos o con el sistema Kdp de *E. coli* es discutible. La ATPasa ($Na^+ + K^+$) está constituida por un polipéptido de un peso molecular aproximado a 100.000 y una glicoproteína con un peso aproximado a 50.000. El sistema Kdp de *E. coli* está constituido por tres subunidades, de las cuales dos





ANTIPORTE ELECTRONEUTRO

ANTIPORTE ELECTROGENICO

MECANISMOS DE EXTRACCION DE SODIO. El sodio que entra en las células por permeabilidad pasiva, a través del portador de potasio, o asociado a otros transportes, se elimina por procesos que varían de un organismo a otro. En las bacterias, el mecanismo es un antiporte electroneutro (la carga neta que se mueve es nula) o electrogénico (se mueve una carga neta) que provoca la salida del sodio aun en contra de un gradiente de concentraciones, utilizando el potencial de entrada del protón. En el primer caso, el movimiento es independiente del potencial eléctrico pues la carga neta movida es nula pero, en el segundo, el movimiento del sodio es impulsado tanto por la diferencia de concentración de protones, dentro y fuera, como por el potencial eléctrico. En las células animales, la extracción de sodio tiene lugar simultáneamente con la acumulación de potasio, por la actuación de la bomba de potasio y sodio (*ver figura anterior*).

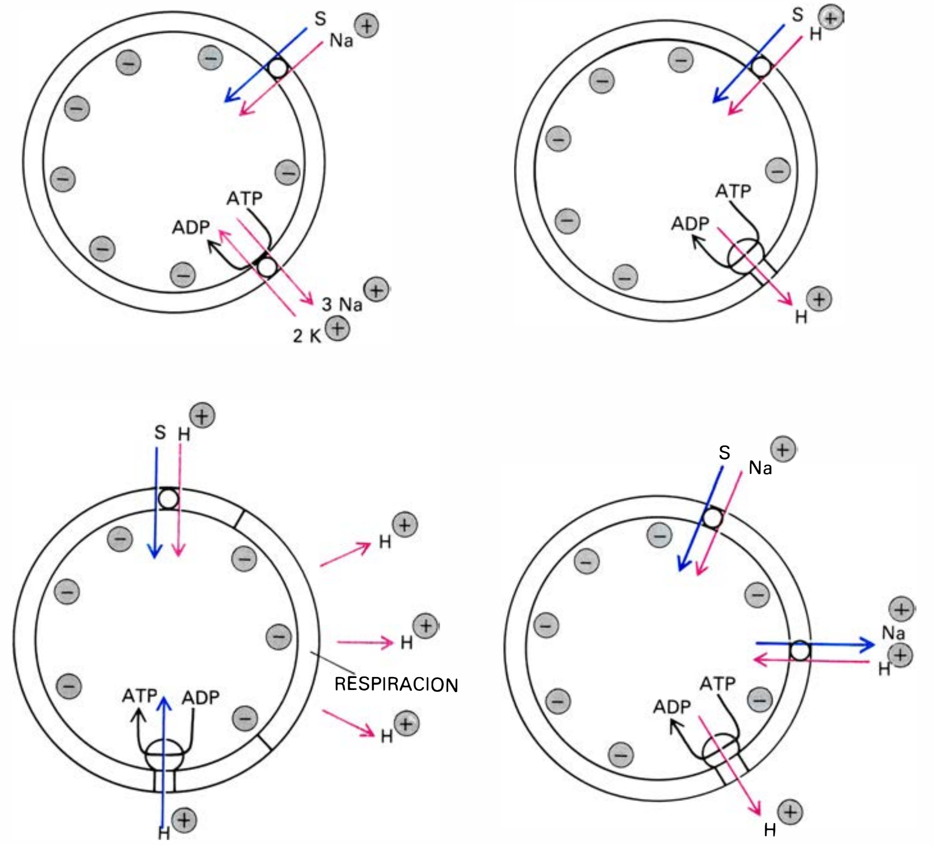
son similares a las descritas, siendo la tercera más pequeña. La ATPasa encontrada en hongos parece tener una sola subunidad con un peso molecular aproximado a la subunidad mayor de la ATPasa ($Na^+ + K^+$). La ouabaina, potente inhibidor de la ATPasa de animales, no influye en las otras dos ATPasas que estamos considerando; el vanadato sí es un inhibidor de la ATPasa animal y de la ATPasa de hongos. Es evidente que estos datos, por sí solos, no prueban ni una relación funcional, ni una relación evolutiva. Se impone ahondar más en el conocimiento de estos sistemas, antes de que podamos abordar el problema en su globalidad.

Los movimientos de cationes expuestos no son los únicos flujos de cationes que tienen lugar en las células de los seres vivos. El sodio y el protón toman parte en la acumulación de otros sustratos. Todas las células de los seres vivos concentran algunos productos que les son necesarios para su metabolismo y que se encuentran en concentraciones bajas en el medio externo. Aunque este tipo de transporte concentrativo consume energía, muchos transportes concentrativos no utilizan energía química, como la que se obtiene por hidrólisis de ATP u otro compuesto químico similar. El mecanismo más común para los procesos de transporte concentrativo es la utilización del potencial eléctrico de membrana y el gradiente de concentración de iones.

Al hablar anteriormente de antiportes, observamos que, utilizando la diferencia del potencial electroquímico del protón a ambos lados de la membrana, el sodio podía ser extraído de la célula aunque en el exterior hubiera una concentración superior a la interior. Muchos compuestos necesarios para la vida se concentran en la célula por un proceso basado en las mismas consideraciones energéticas. La diferencia con el proceso de extracción de sodio estriba en que, en estos casos, catión y sustrato se mueven conjuntamente en un proceso que se conoce con el nombre de simporte. Así se transportan azúcares, aminoácidos, vitaminas, bases para los ácidos nucleicos, etcétera.

Algunos años atrás se consideraba que en las células animales los procesos de simporte tenían lugar con el catión sodio, en tanto que en las células de las bacterias y de los vegetales estaba implicado el protón. Esta generalización resultó ser demasiado simple. A medida que progresó la investigación, se fue descubriendo que algunas bacterias marinas también utilizaban el sodio. Recientemente se han encontrado muchos datos que prueban que en las bacterias los simportes con sodio son generales. En plantas y hongos las pruebas de simportes con sodio son escasas; siendo uno de esos ejemplos el de *Saccharomyces cerevisiae*, donde el transporte del fosfato puede realizarse con sodio.

Desde un punto de vista teórico hay que tener en cuenta que tanto las bacterias como los hongos poseen mecanismos para la extracción del sodio (probablemente también las plantas), por lo



UTILIZACION DEL POTENCIAL ELECTROQUIMICO de los cationes para la acumulación de otros sustratos. La mayor concentración de sodio o de protones en el exterior de la célula y el potencial eléctrico existente a través de la membrana arrastra a otros sustratos al interior. El sodio o el protón son extraídos de nuevo por el mecanismo encargado de ello en cada caso. En última instancia, la hidrólisis del ATP o el potencial de membrana que se ha creado por la respiración, constituyen el origen de la energía.

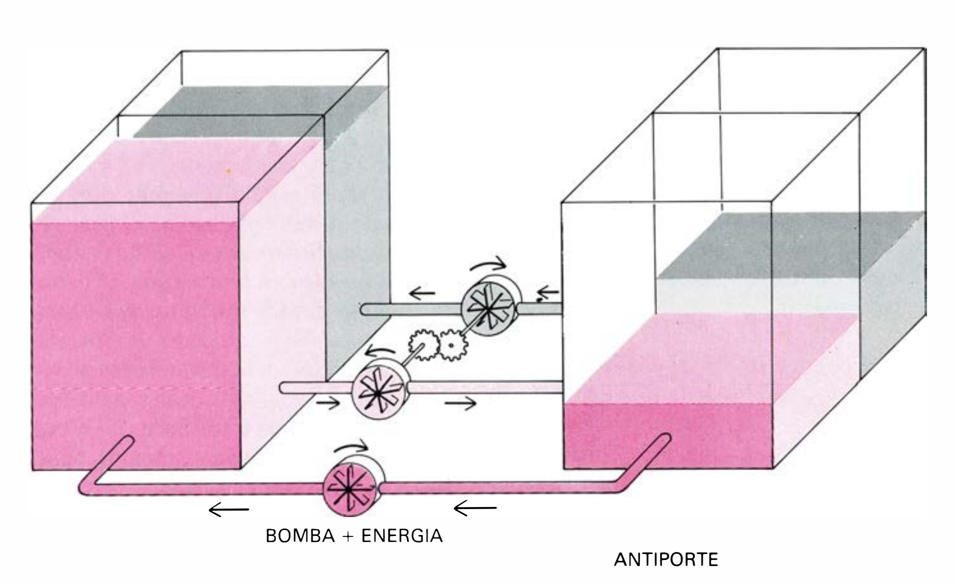
que pueden reciclar el catión y por tanto utilizar simportes con sodio. En el caso de las células animales, el problema es distinto, pues poseen bomba de sodio [la ATPasa ($Na^+ + K^+$)], pero no bomba de protones (son excepción las células de algunos tejidos), dependiendo la extracción del protón de los mecanismos de regulación del *p*H.

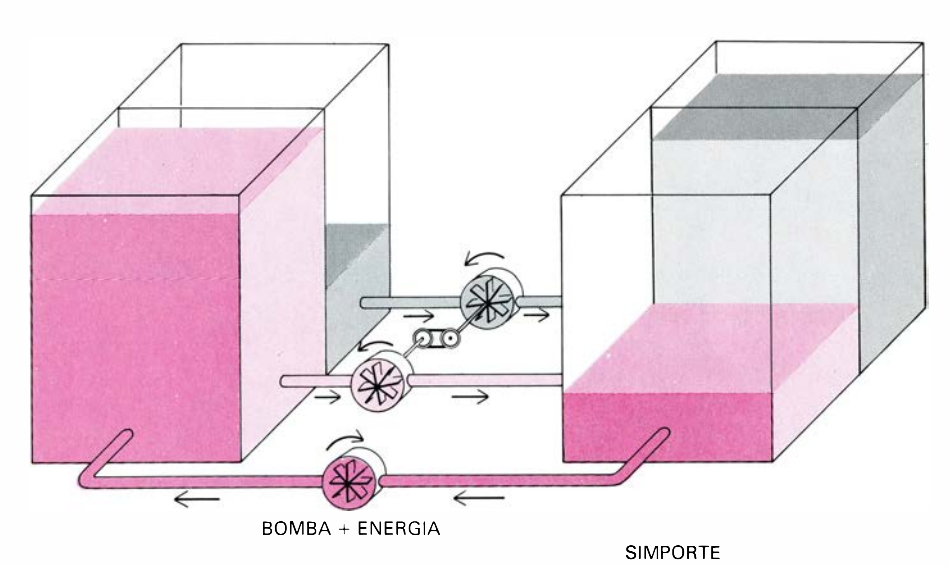
Cuando se consideran organismos pluricelulares, el papel del potasio y del sodio se complica mucho más, pues a las funciones que los cationes desempeñan en las células hay que añadir un buen número de funciones intercelulares que utilizan los gradientes o los flujos de potasio y sodio. En las plantas, la absorción y la selección de cationes se realizan en las raíces; la composición de las células de la planta refleja la del medio, existiendo excreciones de sodio sólo en las plantas adaptadas a ambientes salinos. En los animales el problema no se resuelve con tanta simplicidad, pues la composición de los líquidos extracelulares es netamente diferente de la de la célula, manteniéndose constante gracias a mecanismos de excreción. El contenido en sodio y potasio de los líquidos extracelulares se parece al del agua de mar de distintas épocas. En los animales terrestres, la composición se asemeja a la de los mares en el período precámbrico, cuando se supone que aparecieron probablemente los animales con circulación cerrada. La salinidad sódica de los mares ha ido aumentando desde entonces, tanto en valor absoluto como en relación con el potasio, y muchos animales marinos se han adaptado a esta variación aumentando el contenido en sodio de los líquidos extracelulares. En cualquier caso, es evidente que aunque el sodio se encuentra en cantidades muy bajas dentro de la célula, los animales necesitan sodio para sus líquidos extracelulares. Los requerimientos de sodio y potasio en las plantas difieren considerablemente de las necesidades que muestran los animales con circulación cerrada.

Las plantas que no están adaptadas a suelos salinos no requieren sodio (podrían ser excepción las plantas con fotosíntesis C-4) y en ellas el potasio cumple las funciones celulares ya mencionadas: neutralización de cargas, osmorregulación, transporte de solutos, control de *p*H, etcétera. El potasio de la solución del suelo es transportado por las células corticales de la raíz a su interior por un proceso de cambio con protones que probablemente responde a lo que se expuso para hongos. De las

BIOTOPO	SODIO	POTASIO	ORGANISMO	INTERCELULAR		CELULAR	
				SODIO	POTASIO	SODIO	POTASIO
AGUA DE RIO	0,2	0,05	ALGA (*NITELLA*)	—	—	15	100
AGUA DE MAR	500	10	CALAMAR	450	20	50	400
SUELO NORMAL	0,4	0,2	GIRASOL	2	20	10	150
LAGOS SALADOS	3500	50	BACTERIA HALOFILA (*HALOBACTERIUM*)	—	—	500	4000
			MAMIFERO TERRESTRE	150	5	10	150

CONCENTRACIONES DE SODIO Y POTASIO, en miliequivalentes por litro de agua, en distintos biotopos y en los organismos que los habitan. El sodio es el catión más abundante de los biotopos.





MODELO HIDRAULICO DE ANTIPORTES Y SIMPORTES. El líquido rojo tiene mayor potencial hidráulico en el depósito 1 que en el 2. Al pasar del depósito 1 al 2, el líquido rojo hace girar un rodete que está conectado con otro, interpuesto en la conducción azul. En el caso del antiporte, la conexión se hace con un engranaje que hace girar los rodetes en sentidos contrarios y, por tanto, circular los dos líquidos en sentidos opuestos. En el caso del simporte, la conexión es directa, por lo que los dos líquidos circulan en el mismo sentido. El resultado es que el líquido azul se mueve en contra de su potencial hidráulico arrastrado por el movimiento del líquido rojo. La bomba que conecta el líquido rojo en los dos depósitos es la que eleva este líquido consumiendo energía; se trata, además, de la bomba primaria de todo el proceso.

células corticales el potasio se mueve radialmente, célula a célula, hasta los vasos del xilema, por un proceso no del todo conocido. Del líquido vascular e intercelular, cada célula transporta el catión para sus propias necesidades. En determinadas condiciones, la concentración de potasio en la solución del suelo puede ser muy baja, bien por haber sido muy lavado el suelo o bien por el cultivo del mismo. En condiciones de cultivo, el potasio es exportado por las cosechas disminuyendo las reservas disponibles para la planta, pues el potasio de los minerales del suelo no está disponible para la planta. La carencia de potasio, sobre todo si es intensa, tiene obviamente múltiples efectos para las plantas. Sin embargo, en carencias parciales, el crecimiento de la planta es el primer afectado en muchas especies, debido a deficiencias en la osmorregulación. La falta de potasio disminuye el potencial osmótico de la célula y, aunque la planta moviliza azúcares para compensar este defecto, por debajo de un determinado nivel, la carencia de potasio afecta al alargamiento de los entrenudos.

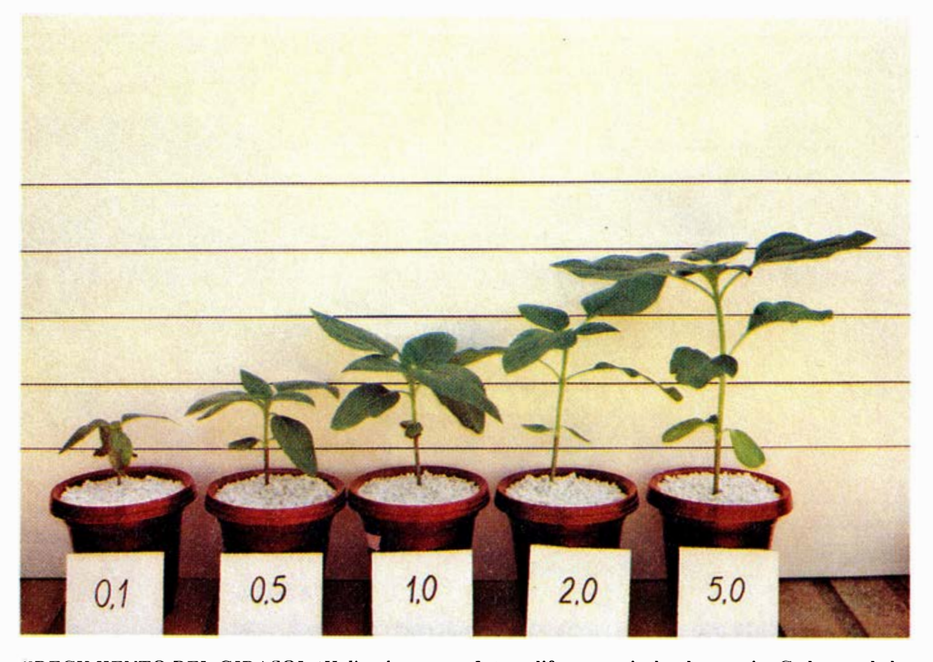
Como antes vimos, el papel del sodio en los animales de circulación cerrada difiere absolutamente del que pueda desempeñar en los demás seres vivos. La composición constante de los líquidos extracelulares ha determinado que, a lo largo de la evolución, se hayan conformado sistemas de relaciones intercelulares basadas en la presencia del sodio extracelular. Por ello, en los animales, el sodio no sólo está implicado en las funciones celulares a las que antes aludimos (osmorregulación, transporte, actividad enzimática, etcétera), sino además en otras que, como el impulso nervioso, dan unidad regulando el comportamiento de las células de diferentes órganos y tejidos. El impulso nervioso se presenta merced a la modificación de la permeabilidad a los cationes sodio y potasio, lo que ocasiona cambios en el potencial eléctrico a través de la membrana.

En los animales, la dieta provee las cantidades necesarias de potasio y sodio para mantener el nivel de potasio en las células y de sodio en los líquidos extracelulares. Una dieta normal contiene cantidades importantes de potasio, pero puede ser muy baja en sodio si la dieta es exclusivamente vegetal. La función renal regula con precisión los niveles de sodio y potasio en el plasma, reteniendo eficazmente el sodio cuando la dieta es baja en este catión. Al contrario de lo descrito para los vegetales, y por las razones expuestas, en los animales sólo se presentan carencias de sodio y potasio en condiciones patológicas. Cuando esto se produce, bien por disfunción de los mecanismos de regulación o cuando, por razones físicas, se registra una disminución o aumento de los fluidos corporales afectando a las concentraciones de sodio y potasio, la función muscular y la nerviosa son las primeras afectadas.

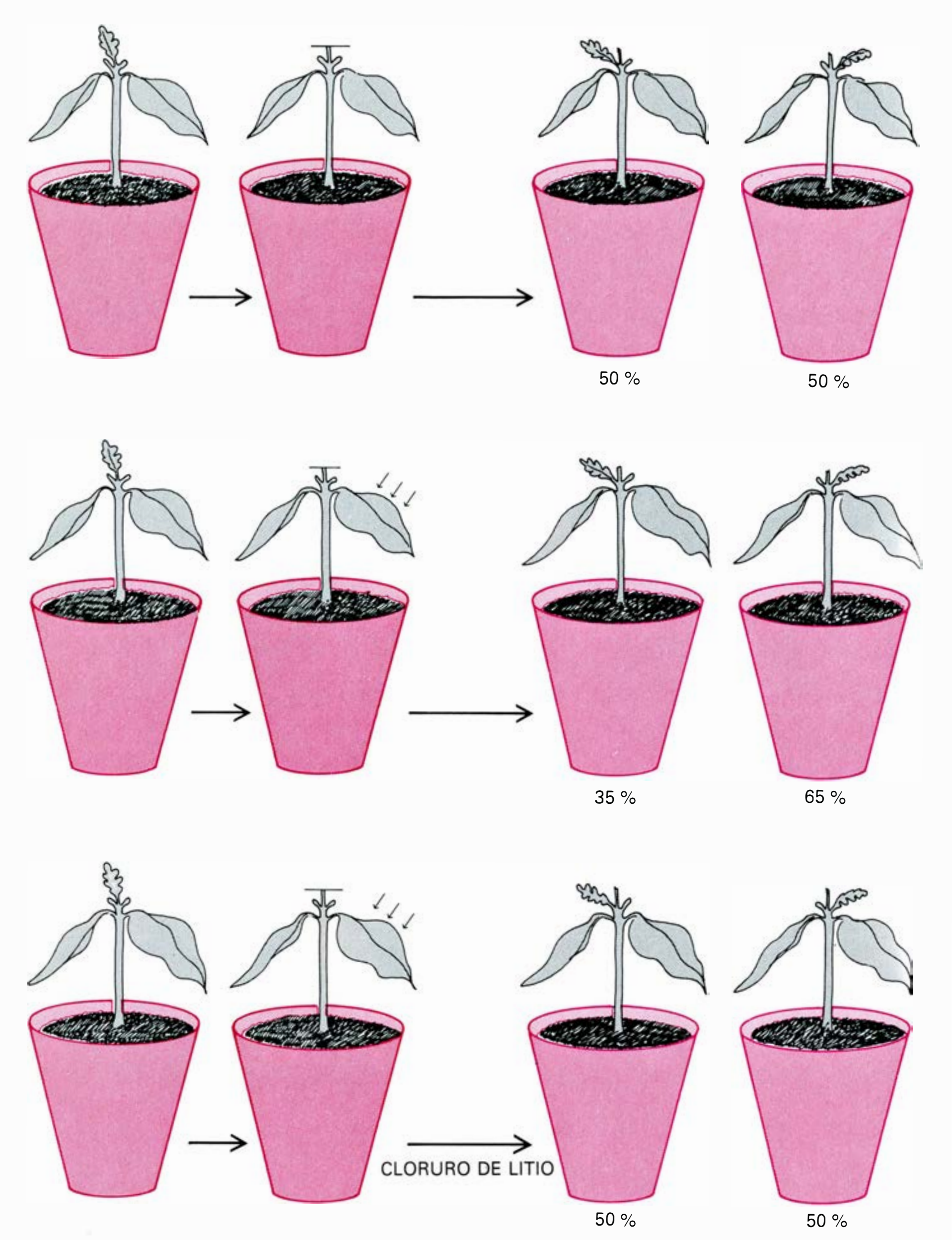
La información que durante los últimos años se ha venido acumulando sobre la función de los cationes alcalinos pone cada vez más de manifiesto el papel central que estos cationes tienen en un número muy elevado de procesos. Un ejemplo indicativo de que existen estas funciones, aún no establecidas con claridad, lo tenemos en los efectos descritos para otro catión alcalino, el litio. El litio es un catión que se encuentra en la naturaleza en cantidades pequeñas en algunos minerales, particularmente silicatos, y en pequeñas cantidades también en el agua de mar. Químicamente, el litio comparte ciertas propiedades con el sodio y es de suponer que su actuación en los seres vivos se produzca por interferencia con los procesos en los que toman parte el sodio o el potasio.

La existencia de aguas minerales que contienen cantidades apreciables de litio y la reputación de que sus propiedades terapéuticas se debían a la presencia del catión atrajo un considerable interés sobre el mismo. La mayoría de las propiedades terapéuticas atribuidas al litio no han podido ser demostradas, pero en cambio su actuación como agente psicoterapéutico está fuera de toda duda, siendo el primer agente psicofarmacológico utilizado. El efecto del litio sobre el temperamento y su valor en el tratamiento de la manía depresiva pone de manifiesto, por encima de la valoración clínica del catión, el papel que en este proceso pueden desempeñar los cationes alcalinos.

En vegetales hallamos otro ejemplo que puede ser indicativo de la misión que los cationes alcalinos pueden cumplir en la morfogénesis. Si a una planta de *Bidens pilosa L.* se le corta la yema terminal cuando sólo tiene los dos cotiledones, una de las dos yemas axiales se desarrolla para sustituir a la yema terminal eliminada. Si orientamos una serie de plantas de *Bidens* con un cotiledón hacia la derecha y el otro hacia la izquierda, y cortamos la yema terminal, la mitad de las plantas desarrollarán la yema de la derecha y la otra mitad la de la izquierda. Esta respuesta aleatoria puede controlarse, sin embargo, si efectuamos un ligero traumatismo sobre uno de los cotiledones. Pinchando uno de los cotiledones, las plantas desarrollarán, en un 65 por ciento, la yema del lado contrario. La señal de la herida se transmite muy rápidamente



CRECIMIENTO DEL GIRASOL (*Helianthus annus* L.) en diferentes niveles de potasio. Cada uno de los tiestos se regó con una solución nutriente con la concentración de potasio indicada e igual composición de los otros componentes. Las células de los tallos de las plantas regadas con las soluciones que contenían menos potasio tenían un menor contenido del catión y un potencial osmótico más bajo. La foto se obtuvo a los veinticinco días de la germinación. (Fotografía que se publica por cortesía del Dr. Díaz de la Guardia.)



ANULACION POR CLORURO DE LITIO de la brotación diferencial de las yemas cotiledonares de *Bidens pilosa* L. Cuando a una planta de *Bidens* le cortamos la yema terminal por encima de los cotiledones, se desarrolla una cualquiera de las dos yemas axilares. Por el contrario, si se origina un traumatismo pinchando en uno de los cotiledones antes de cortar la yema terminal, la yema del lado contrario se desarrollará preferentemente, con una frecuencia del 65 por ciento. Cuando se riegan las plantas con cloruro de litio, a concentraciones tan bajas como 10^{-7} molar, esta respuesta diferencial queda anulada.

desde el cotiledón herido; si se cortan ambos cotiledones un minuto después de herir uno, la respuesta no variará de la obtenida con las plantas sin cortar los cotiledones. Pero si se riegan las plantas con cloruro de litio, incluso a concentraciones tan bajas como 10^{-7} molar, las plantas responderán como si no hubieran sido heridas; es decir, cada yema con el cincuenta por ciento de probabilidades.

El desarrollo de nuestro conocimiento sobre las funciones de los cationes alcalinos, y la revelación de sus mecanismos de transporte, con toda seguridad, nos ayudarán a comprender aspectos hoy en día desconocidos de la fisiología de los seres vivos. Sin embargo, la aplicación más inmediata de estos conocimientos es terapéutica. Los microorganismos, tanto eucariotas como procariotas, tienen mecanismos encargados del transporte de cationes que difieren considerablemente de los que tienen los animales. Estas diferencias abren el camino para el desarrollo de drogas que, afectando a los primeros, no incidan en los segundos. Hay que tener presente que ningún microorganismo podría prosperar en los fluidos extracelulares de los animales si se bloquearan sus mecanismos para el transporte de los cationes alcalinos.



RETRATO DE CHRISTOPHER WREN rodeado de instrumentos científicos, libros y obras de arte. El libro que tiene a sus pies aparece abierto en la página que muestra un grabado del Sheldonian Theatre de Oxford, su primera obra. En su mano izquierda, un plano de la catedral de San Pablo, que reconstruyó después del incendio de 1666. En el horizonte, al fondo, se ve la silueta de Londres mostrando algunas de las iglesias por él construidas y una vista de San Pablo según uno de los primeros dibujos. El retrato se guarda en el Sheldonian y es obra de Antonio Verrio, James Thornhill y Godfrey Kneller.

La arquitectura de Christopher Wren

Destacado arquitecto y eminente hombre de ciencia, no utilizó, sin embargo, en los proyectos de sus edificios los principios de la mecánica teórica que él conoció perfectamente por hallarse en la vanguardia de la revolución científica

Harold Dorn y Robert Mark

En la cripta de la catedral de San Pablo de Londres hay una lápida sepulcral con la siguiente inscripción que, traducida del latín, dice: "Lector, si quieres ver mi monumento, mira a tu alrededor". Es el epitafio de Sir Christopher Wren, autor de la catedral y de casi cincuenta iglesias en Londres, además de hospitales, bibliotecas y casas reales en toda Inglaterra. Wren fue también uno de los científicos más importantes de Gran Bretaña, contemporáneo de Isaac Newton, Robert Hooke y Robert Boyle. Newton se refirió a él como "el más grande geómetra de nuestros tiempos"; Hooke, que rivalizaba con Newton en fama y celebridad, y no solía alabar a nadie, comparó a Wren con Arquímides.

La doble vertiente, arquitectónica y científica, de Wren era el resultado de una paradójica carrera. Siendo Wren experto en astronomía, fue, en cambio, nombrado por Carlos II inspector general de los arquitectos ingleses. Wren alcanzó su mayor reputación científica y la presidencia de la Royal Society sin haber publicado casi nada. En teoría arquitectónica abominó de los arbotantes, pero en la práctica los utilizó abundantemente en San Pablo. Abogó por la aplicación de la estática teórica en la construcción, pero los principios de la mecánica por él recomendados eran incorrectos, y, por tanto, su aplicación hubiese conducido al fallo de las estructuras. Con frecuencia habló en contra de la arquitectura puramente decorativa y, en cambio, su mayor logro en el campo estructural, el cono de fábrica de ladrillo que soporta la linterna de la cúpula de la catedral de San Pablo, así como la bola y la cruz, está recubierto exteriormente por un cascarón decorativo sin función estructural.

Pero quizá lo más sorprendente de Wren sea la imposibilidad de hallar conexiones entre su arquitectura y sus conocimientos científicos. Dado que Wren trabajó en el punto culminante de la revolución científica del siglo XVII, se ha pensado muchas veces que pudo haber puesto en práctica alguno de los principios de la mecánica teórica en la construcción. La revolución científica significó una promesa de incremento de aplicaciones mecánicas en la construcción. En el "Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo", de Galileo Galilei, el primer sistema no es la dinámica, por la que ahora el libro es más conocido, sino la resistencia de materiales, que Galileo había reconocido treinta años antes como "una ciencia muy necesaria para hacer máquinas y edificios de todo tipo". En 1624 Henry Wotton, embajador británico en Venecia, publicó un libro de arquitectura en el que estudiaba de modo rudimentario el comportamiento mecánido de un arco pétreo. Téngase en cuenta que en el siglo XVII eran los hombres que hoy llamaríamos científicos los que se encargaban de proyectar y construir estructuras monumentales.

En Turín, Guarino Guarini, un matemático, trazó los planos para edificios tan importantes como la iglesia de San Lorenzo, la capilla de la Sábana Santa y el palacio Carignano. En París, Claude Perrault, un físico y especialista en anatomía, trazó la fachada del Louvre y el observatorio de la Academia de Francia. En Londres, Wren y Hooke trabajaron en colaboración como arquitecto e inspector de obras después del gran incendio de 1666.

Nosotros hemos estudiado de nuevo algunas de las soluciones estructurales de Wren con ayuda de modernas técnicas de ingeniería. Por medio de nuestras investigaciones técnicas, y a través de la lectura de los escritos de Wren, hemos intentado encontrar el lugar de este arquitecto y de su obra en el campo de la revolución científica.

Wren nació el 20 de octubre de 1632 en East Knoyle, Wiltshire. De joven recibió fuertes influencias de tradición religiosa que reaparecieron más tarde en su arquitectura. Su padre fue deán de Windsor y un tío suyo obispo de Ely. En la Universidad de Oxford, donde ingresó en 1649, su tutor fue John Wilkins, más tarde obispo de Chester. De joven, Wren sintió ya interés hacia los instrumentos y artificios mecánicos. En Oxford preparó una exposición de medio centenar de aparatos, casi todos de naturaleza práctica, incluyendo "nuevos diseños acerca de la resistencia, conveniencia y belleza de los edificios". Fue en Oxford donde empezó a demostrar gran capacidad para la matemática, lo que le valió el elogio de Newton.

En 1657, cuando tenía 25 años, fue nombrado profesor de astronomía en el Gresham College de Londres y, cuatro años después, elegido maestro de astronomía en Oxford, cátedra que conservó hasta 1673. En 1662, al establecerse formalmente la Royal Society, Wren figuró entre los miembros fundadores y también directivo, siendo autor del borrador del preámbulo del texto fundacional. El énfasis que puso Wren en pro de lo utilitario indica su postura favorable a la promoción de las artes prácticas, más que las puramente especulativas. Entre las funciones de la Sociedad, escribió, "debería estar el perfeccionamiento de la filosofía natural experimental, especialmente en las partes referidas al incremento del comercio con la incorporación de inventos útiles destinados a la comodidad, provecho y salud de los asociados".

La carrera arquitectónica de Wren comprende casi medio siglo. Empezó en 1662, cuando le fue encargado el Sheldonian Theatre de Oxford, y terminó alrededor de 1710, con la finalización de la Catedral de San Pablo.



SHELDONIAN THEATRE, de Oxford, proyectado por Christopher Wren en 1662 muy lejos de la tradición gótica de la arquitectura universitaria oxoniense. Está inspirado en el teatro de Marcelo en Roma.



REPRESENTACION DEL CIELO en el techo del Sheldonian Theatre. Este techo plano, que mide más de 20 metros, impresionó a los contemporáneos de Wren por la ausencia de columnas. La semejanza de este teatro con el de Marcelo viene acusada por la existencia de unas cuerdas para sostener un imaginario toldo, ya que el teatro romano tenía un velarium que se podía recoger con las cuerdas para dejar visible el cielo. El título es "La Verdad descendiendo sobre las Artes y las Ciencias" y representa el triunfo del Arte y la Ciencia sobre la envidia, la violencia y la ignorancia. El artista Rober Street fue su autor.

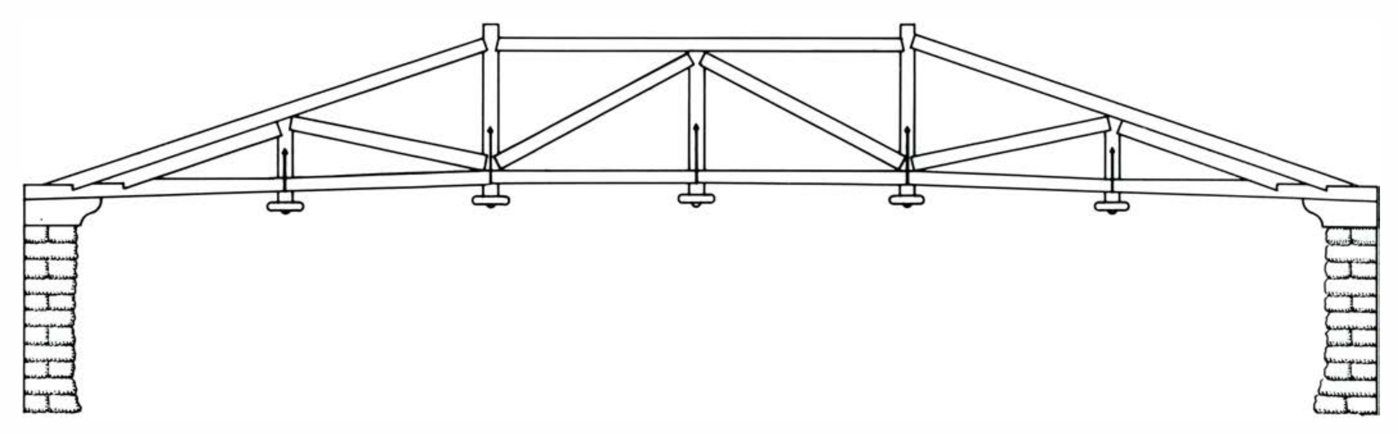
Se considera que estos dos edificios contienen las más avanzadas soluciones de Wren en el tratamiento de los problemas ingenieriles; ambos muestran dos importantes características de su arquitectura. La primera es la evidente relación con los estilos clásicos, cuya característica se evidencia en la arquitectura conservadora y las estructuras muy macizas. En algunos casos extremos, como sucede en partes de San Pablo de Londres, la estructura es tan excesivamente pesada que llega a amenazar la estabilidad y supervivencia de la obra.

La segunda característica de la arquitectura de Wren es su predilección por el uso de nuevos sistemas estructurales. Debido a estos elementos se ha llegado a pensar en una estrecha relación entre arquitectura y ciencia en el proceder de Wren. En el Sheldonian Theatre los elementos innovadores fueron los cuchillos de armadura de madera, que sostienen el techo del auditorio. En la catedral de San Pablo, el más admirado edificio de Wren, el elemento innovador radica en la cúpula compuesta de tres cascarones concéntricos. Por esta razón, ambos edificios proporcionan el mejor material para un estudio de las relaciones entre ciencia y arquitectura en su obra.

El Sheldonian Theatre debe su nombre a Gilbert Sheldon, que fue tutor en el All Souls College de Oxford hasta su expulsión en tiempos de Oliver Cromwell. Volvió a Oxford después de la restauración de Carlos II, y aunque su segunda estancia fue breve, ya que muy pronto recibió el nombramiento de obispo de Londres, fue lo suficientemente larga para procurar suprimir las reuniones civiles en la iglesia de la universidad. Sheldon dio 12.000 libras para la construcción del teatro. Al escoger a Wren como arquitecto distinguió a un compañero de colegio que, además, era sobrino de un obispo.

Wren se inspiró en el teatro de Marcelo en Roma, siguiendo los grabados, del siglo XVI, del arquitecto, pintor y tratadista boloñés Sebastiano Serlio. El modelo original tenía forma de herradura y era a cielo abierto, cubierto tan sólo con una lona o "velarium". El proyecto de Wren es una aproximación poligonal al modelo romano del teatro, pero con un techo fijo. Dispuso además un edificio de uso múltiple, pues el sótano era para la imprenta de la universidad y el ático, o sotabanco, para almacén de libros que en ella se imprimiesen.

El proyecto es especialmente notable, pues supuso un abandono de la in-

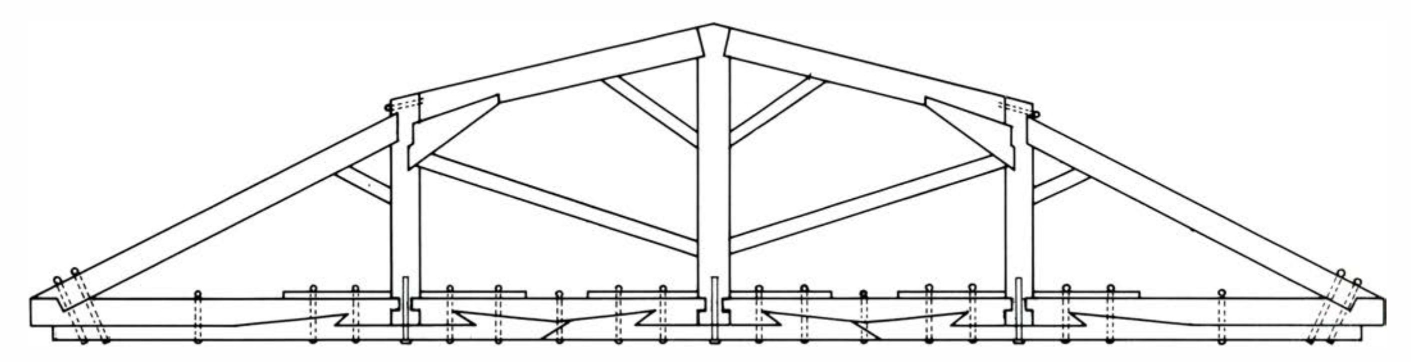


ARMADURA DE MADERA, descrita en 1570 en *Los cuatro libros de la Arquitectura* del arquitecto véneto Andrea Palladio. Debe su eficacia a estar construida con segmentos triangulares. El cuchillo está reforzado cerca de los apoyos para mejor absorción de los esfuerzos que en tales puntos se suman. Wren tuvo acceso al libro de Palladio, pero no adoptó el sistema de armadura triangulada en los cuchillos de la cubierta del teatro Sheldonian de Oxford.

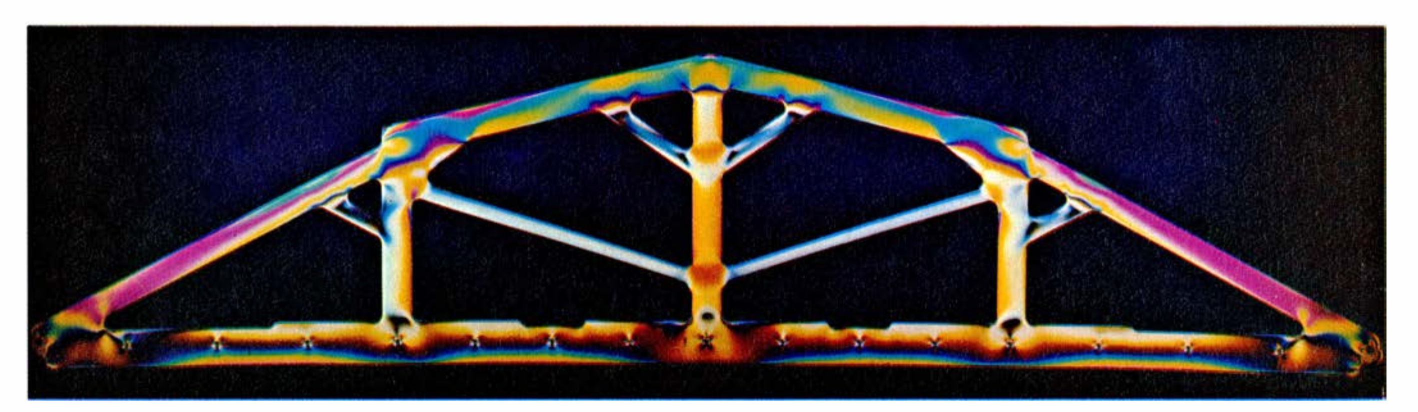
veterada tradición gótica de Oxford. Aunque un buen número de biógrafos de Wren han considerado que el diseño no alcanza la calidad de su obra de madurez, han admirado en especial el techo plano del auditorio sin columnas: el techo se sostiene mediante pesadas armaduras de madera escondidas en el sotabanco. Para demostrar la originalidad de la solución, Wren preparó una exposición de la maqueta del Sheldonian en la Royal Society en 1663. La forma de las armaduras es, sin embargo, defectuosa. Tienen más semejanza con los cuchillos de madera medievales que con los de formas triangulares, que reducen al mínimo las fuerzas de flexión. El arquitecto véneto Andrea Palladio explicó este tipo de cuchillos triangulares en la construcción de puentes en sus *Cuatro Libros de Arquitectura*, publicados en 1570. Wren conoció el libro de Palladio, lo cual hace suponer que no reparó en la gran eficacia de la forma triangular o no relacionó la estructura de un puente con los cuchillos de cubierta en edificios.

Nuestras conclusiones fueron comprobadas mediante el análisis de los cuchillos de armadura de Wren por medio de la fotoelasticidad, situando un modelo a escala del cuchillo, hecho con plástico transparente, entre dos haces de luz polarizada cruzados. El tipo de interferencia que resulta del paso de la luz a través del emparedado de materiales da lugar a un mapa de perfiles de intensidades de fuerzas. Se pudo comprobar entonces que, a pesar de ser deficientes, los cuchillos de Wren eran capaces de soportar cargas normales. Los cuchillos originales fueron sustituidos por otros de 1802, debido, seguramente, al aumento de las sobrecargas por la mayor cantidad de libros almacenados en el sotabanco.

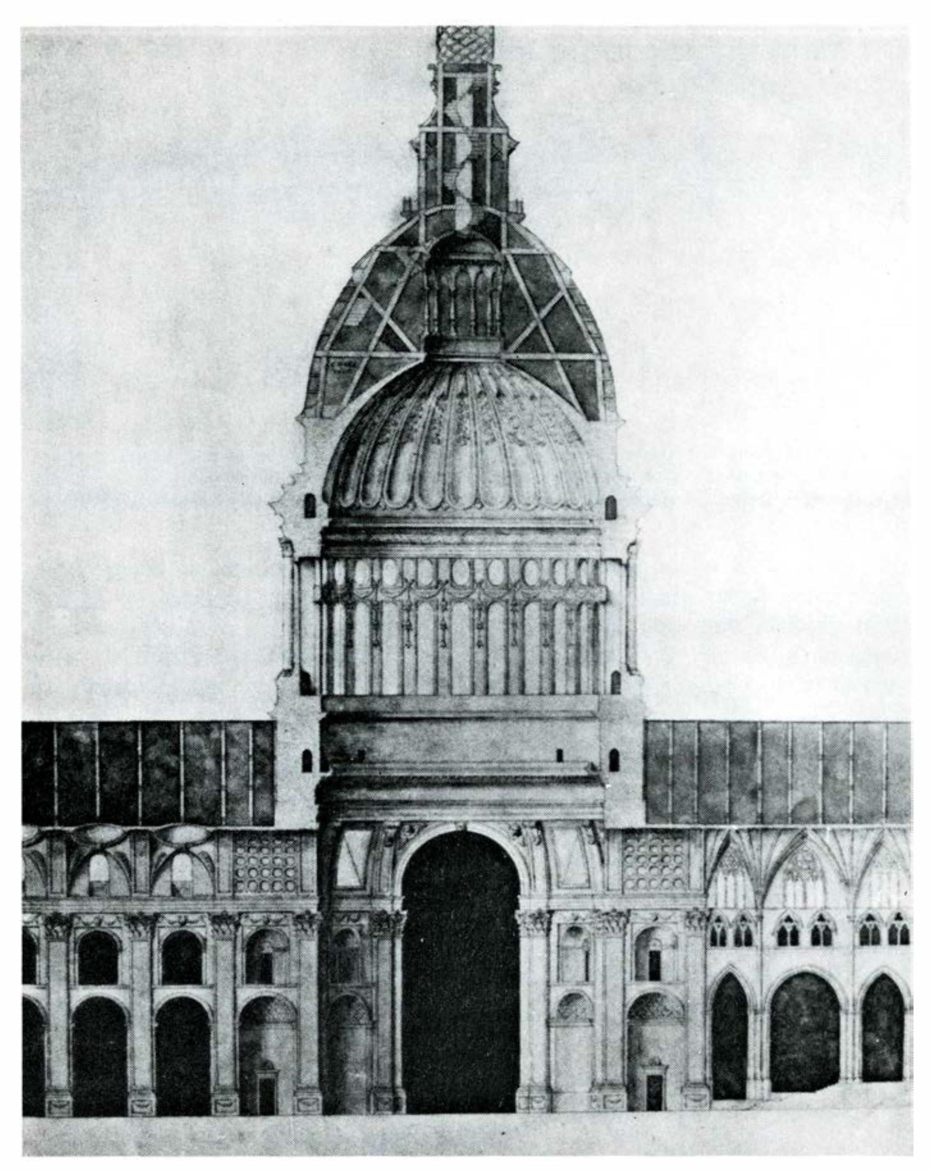
Sea cual sea la calidad resistente de la techumbre de Wren, su cálculo nada



ARMADURA ESCONDIDA EN EL SOTABANCO, o ático, del Sheldonian Theatre oxoniense, para soporte de la techumbre. Estos cuchillos presentan mayor semejanza con armaduras medievales de par y pendolón que con las descritas por Palladio, que reducen al mínimo los esfuerzos inclinados.



MODELO FOTOELASTICO de las armaduras del Sheldonian Theatre que permite demostrar que los esfuerzos no se reparten uniformemente. El modelo de plástico transparente está fotografiado a través de dos filtros cruzados de luz polarizada. Las interferencias de la luz describen un plano de intensidades de fuerzas. Cada color corresponde a un grado diferente de interferencia y, por tanto, de fuerza. Las áreas de color magenta de los pares junto a los apoyos se encuentran sometidas a doble esfuerzo que las azules. No hay casi fatiga en los tornapuntas, que, por lo demás, apenas muestran interferencia.



SECCION DE UN PROYECTO DE CUPULA para la catedral londinense de San Pablo propuesto por Christopher Wren pocos meses antes del incendio ocurrido en el año 1666. Quería suprimir la torre principal por una cúpula doble y una flecha; la cúpula interior sería de ladrillo y, de madera, la externa.

Wren había tenido ocasión de estudiar la catedral con anterioridad, y eso le ayudó en su tarea de arquitecto reconstructor. Antes de la guerra civil de 1640, el exterior de la vieja catedral de S. Pablo había sido objeto de una campaña de remodelación clasicista bajo la dirección de Iñigo Jones. La nave normanda del siglo XI y el presbiterio gótico del siglo XIII fueron recubiertos por una envoltura pétrea de estilo renacentista; la fachada a poniente fue precedida de un pórtico corintio. Pocos meses antes del incendio se le había pedido a Wren que idease una ulterior restauración. Opinó que debía recomponerse el interior para que concordase con las formas externas renacentistas y que debían sustituirse las bóvedas medievales de cañón seguido apuntado por una sucesión de bóvedas vaídas más ligeras. Wren abominaba del estilo gótico, o como él lo llamó *sarraceno*, del viejo edificio. Hizo notar que los pilares estaban desplomados a causa de una defectuosa construcción y criticó la presencia de arbotantes expuestos a las inclemencias del tiempo. También propuso sustituir la torre central por una cúpula con su chapitel.

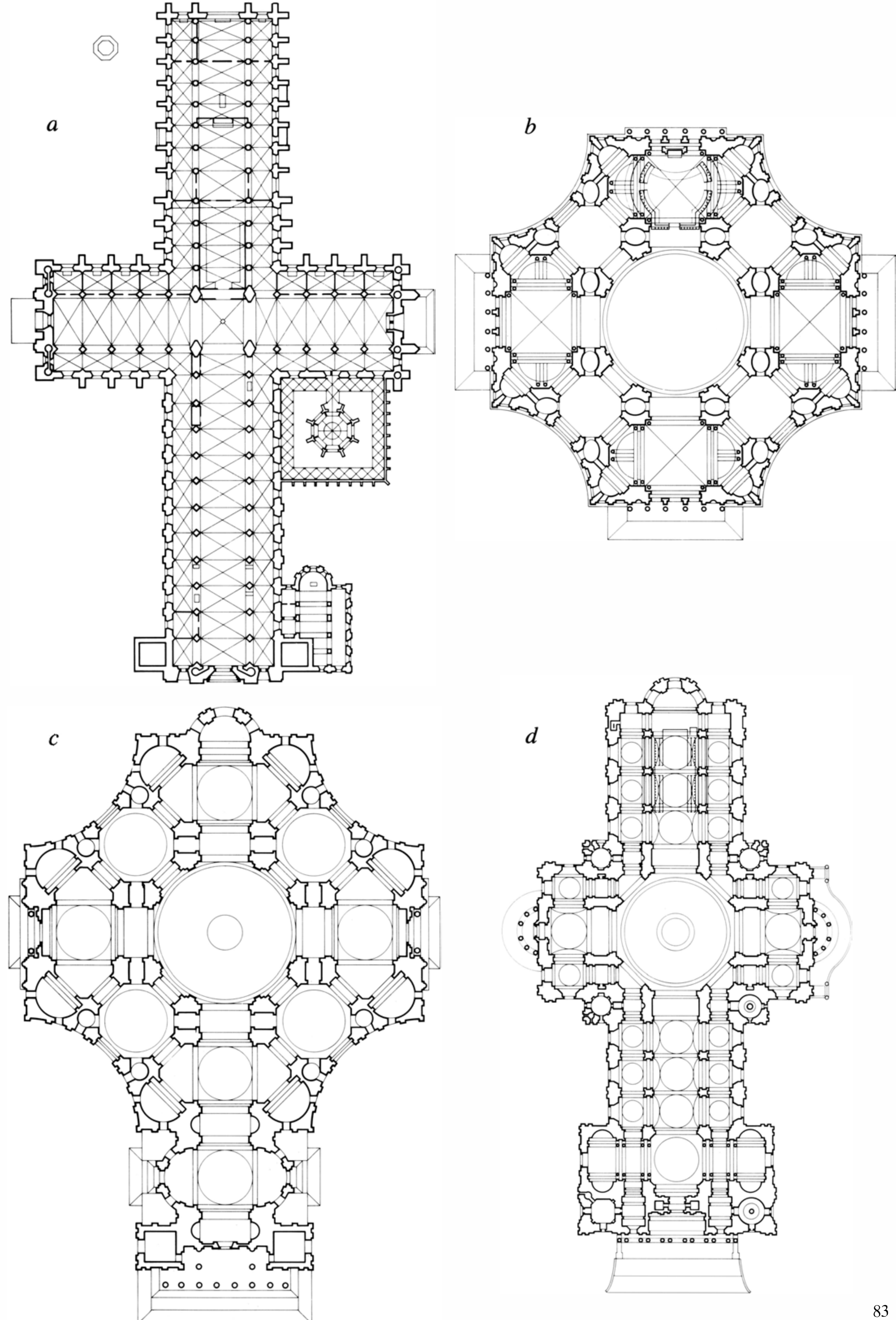
La parte más interesante de esta propuesta de modificación estructural era la ligera y alta cúpula externa de madera y plancha de plomo, sostenida interiormente por una bóveda de ladrillo. El concepto de esta estructura cupular, relativamente sencilla, pudiera derivar directamente de la iglesia, mucho más pequeña, de la Sorbona de París, construida por Jacques Lemercier unos treinta años antes y que Wren pudo ver en 1665. Este tipo de cúpula doble se remonta, siguiendo toda una secuencia de edificios, a los cinco domos de la iglesia de San Marcos de Venecia, construida en el siglo XIII.

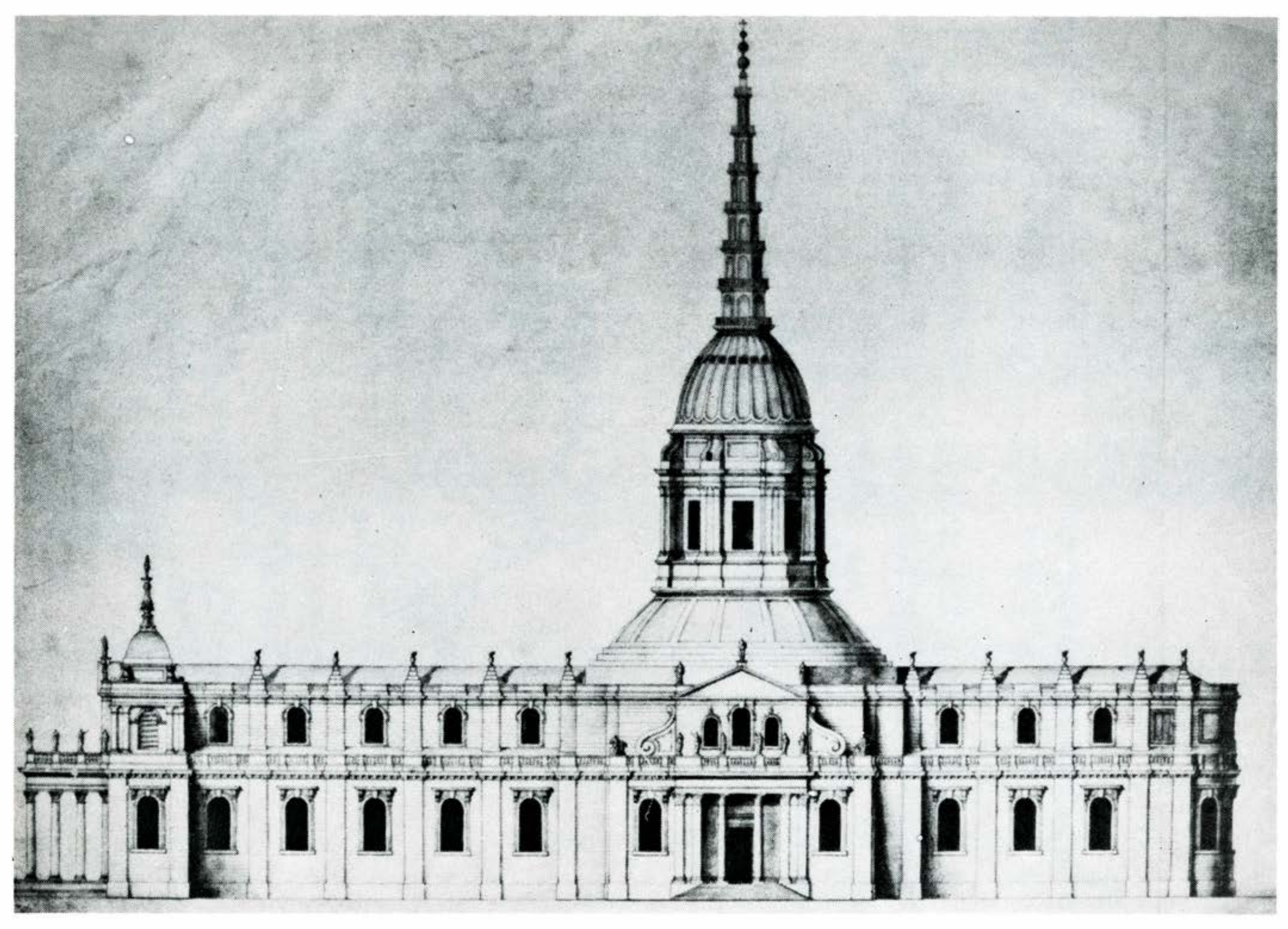
Después del incendio, cuando se determinó que la catedral no podía reconstruirse, Wren se sintió libre para proyectar una nueva catedral siguiendo el estilo romano, tal como había hecho en el teatro de Oxford. La facilidad con que pudo romper la tradición gótica en Oxford no se repitió con sus clientes eclesiásticos de Londres. Ni con el apoyo de Carlos II pudo hacer valer su criterio frente a los clérigos que insis-

tenía que ver con los cálculos teóricos de este tipo de estructuras. Tales cálculos, por sencilla que fuera su forma, no se realizaron sino muchos años más tarde. No hay indicación alguna en las notas de Wren, ni en el testimonio de sus contemporáneos, acerca de que el proyecto del Sheldonian fuera realizado utilizando otros métodos que no fueran los tradicionales o empíricos. Ha sido imposible detectar ninguna novedad basada en la revolución científica en el proyecto del teatro de Oxford. Por esta razón, hemos intentado encontrarlas en la más importante obra de Wren a lo largo de toda su carrera.

El gran incendio de Londres en 1666 tuvo dos consecuencias saludables. Cortó en seco la epidemia que atacaba la ciudad y dio a Wren la oportunidad de demostrar su genio arquitectónico. Una de las necesidades más apremiantes fue la reconstrucción de las iglesias parroquiales, que formaban la base de la vida social y espiritual de la ciudad. En pocos días, Wren desarrolló un plan para reconstruir Londres. Aun cuando su plan no se aceptó, fue sin embargo nombrado arquitecto jefe de las obras de reconstrucción. En el ejercicio de su cargo, y luego en su calidad de inspector general, acometió la reconstrucción de las parroquias que constituyen su más importante legado arquitectónico. Al mismo tiempo, se preocupó de la restauración de San Pablo, seriamente dañada por el fuego.

LA SECUENCIA DE PLANTAS para San Pablo ilustra las concesiones que Wren tuvo que hacer antes de obtener el beneplácito de Carlos II para la obra (*véase la página opuesta*). La figura *a* muestra la planta del viejo San Pablo de planta cruciforme tradicional (*a la izquierda, arriba*). La figura *b* es el proyecto de cruz griega, de 1672. Lo más destacado es el espacio circular cupulado en el centro. Esta planta concentrada parece reflejar las creencias protestantes de Wren con idea de aproximar el pueblo al celebrante mucho más que en las iglesias medievales. La figura *c* corresponde al "Great Model Design", llamado así por la gran maqueta de casi 5,50 metros que Wren mandó hacer. La planta es similar a la solución anterior con una prolongación este-oeste de la nave. La figura *d* corresponde a la solución definitiva, empezada en 1675. Es una forma de compromiso entre las plantas concentrada y la de cruz latina.


a
b
c
d



PROYECTO DEFINITIVO hecho por Christopher Wren en 1674 y aprobado por Carlos II el 14 de marzo de 1675. Le fue autorizada la introducción de algunas modificaciones a lo largo de la obra, y el arquitecto ejerció la prerrogativa largamente, construyendo una catedral distinta de la propuesta.

tían en que la planta del nuevo edificio siguiera la forma de cruz latina de las catedrales medievales. Para resolver el problema, Wren presentó varios proyectos, haciendo finalmente algunas concesiones a la autoridad eclesiástica y al gusto popular antes de que le fuera encargada la restauración en 1675.

Lo que Wren había pensado en principio para la catedral se deduce del examen de los dos planos generales para la ciudad de Londres dibujados a poco del incendio. En ambos planos se pueden ver sendas plantas, semejantes a la del Panteón de Roma, que constituían principalmente una rotonda con cúpula unida a una sala rectangular. Algunos comentaristas han considerado estos planos más como esbozos imprecisos que como propuestas en serio. Sin embargo, muestran el propósito de Wren de hacer una gran estructura cupular y su rechazo a la planta tradicional cruciforme. Además, los primeros dibujos pueden reflejar sus ideas protestantes, ya que con tal disposición los fieles y el clero podían estar más próximos que en las iglesias medievales, donde los fieles, en las naves, quedaban alejados de los celebrantes, en el presbiterio.

Wren tenía gran respeto por la liturgia del libro de rezos inglés y concebía la iglesia como un auditorio donde la congregación pudiera ver y oír perfectamente al predicador. Estudió la distancia a la que es audible la voz de un predicador y proyectó las iglesias de acuerdo con ello. La idea protestante de que el clérigo y los fieles participen conjuntamente en las ceremonias exigía una sala de reuniones compacta, cerrada por mamparas. Las trazas en los planos generales de la ciudad muestran la rotonda cupular para ocasiones solemnes y una sencilla sala rectangular para reuniones ordinarias, donde se refleja claramente la idea del protestantismo inglés. Por cuya razón ambos dibujos no son simples croquis, sino el concepto, la idea de Wren para una catedral verdaderamente protestante.

La influencia del protestantismo se detecta también en algunos de los proyectos de Wren para las parroquias. "Sería inútil", escribió, "hacer una parroquia tan grande que los que a ella asistan no puedan verse ni oírse entre sí." En el plano de la parroquial de San Jaime, Wren intentó construir un auditorio ideal, con la nave y el presbiterio en una sola estancia y con tribunas para aumentar la capacidad de personas sentadas sin necesidad de ensanchar el espacio general. "Me parece casi inviable", escribió, "construir una sola estancia con bancos y galerías con capacidad para dos mil personas, y que todas ellas puedan oír y ver al predicador. Yo intenté conseguir esto en la construcción de la parroquia de San Jaime en Westminster, que creo es la más capaz, con tales características, de las que se hayan construido jamás."

Los esbozos de Wren en los planos generales de Londres, concernientes a la catedral de San Pablo, fueron los antecesores de la siguiente serie de proyectos en los que trabajó intensamente en 1670. Estos nuevos dibujos se basan también en una estructura cuyo volumen mayor corresponde a una cúpula de base circular. En una de las versiones, la llamada de planta de cruz griega, incluye una cúpula central sobrealzada, que recuerda la que propuso Donato Bramante para San Pedro del Vaticano. En ambos casos, la idea fue rechazada por los eclesiásticos que prefirieron la planta de cruz latina.



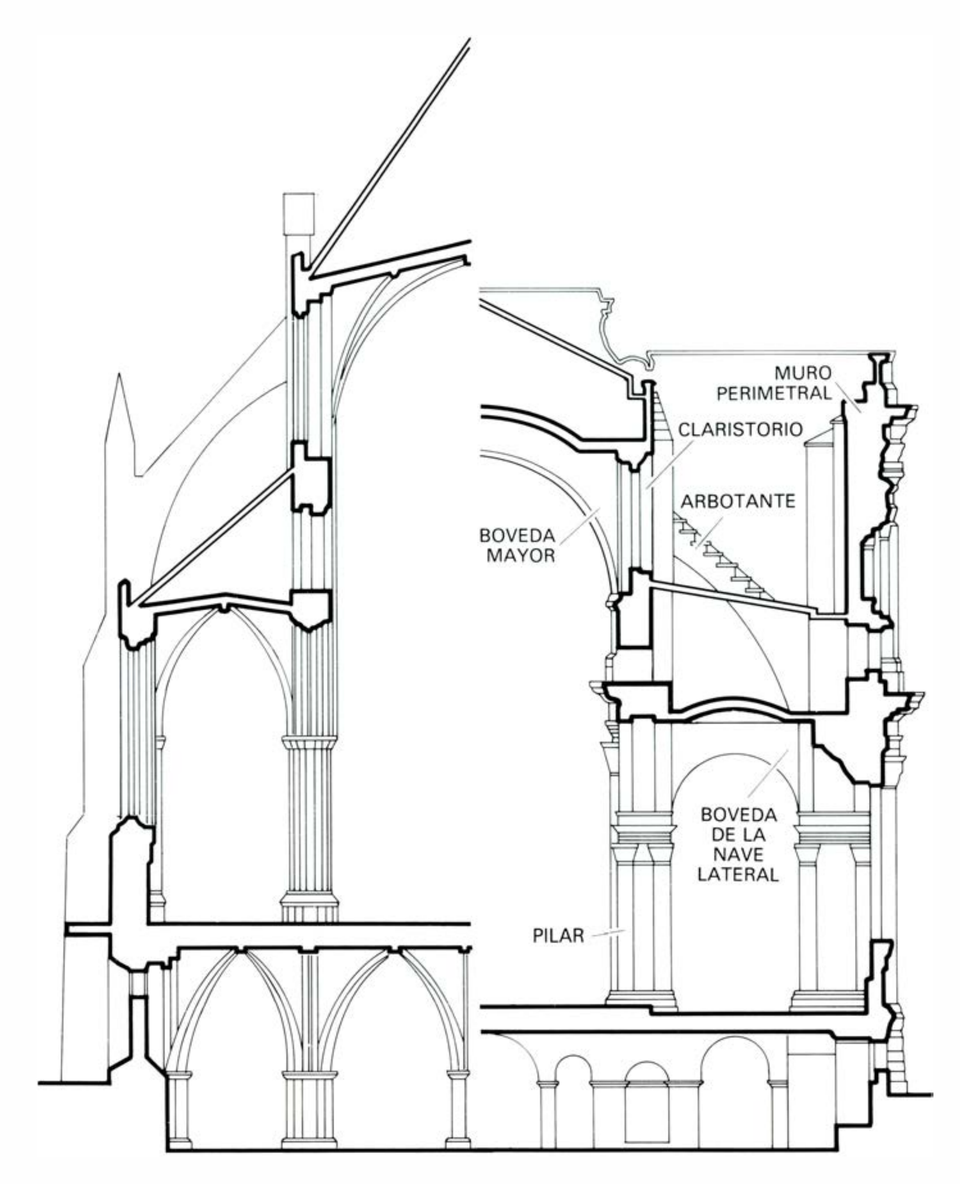
LA CATEDRAL DE SAN PABLO presenta hoy casi el mismo aspecto que cuando la construyó Wren. La balaustrada fue añadida en 1717 a pesar de sus protestas (contaba 85 años de edad y ya no estaba al frente de ella). Newton fue consultado al respecto y se cree que le visitó para tratar de calmarle.

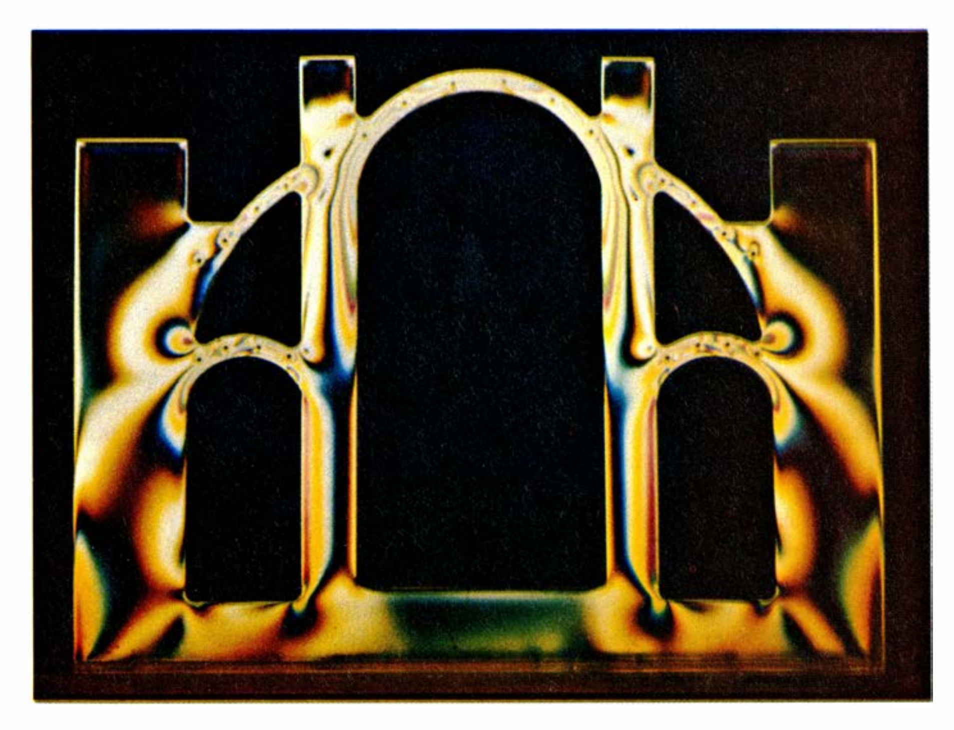
En 1673, en un intento de aplacar las críticas del clero, Wren ofreció el llamado Great Model Design, cuyo plano era similar al de la cruz griega, excepto en una prolongación a lo largo del eje levante-poniente, que de mala gana introdujo para formar una corta nave y un rudimentario presbiterio. El nombre de este proyecto deriva de una gran maqueta que Wren mandó construir con intención de que se pudiera tener una idea de las perspectivas interiores del edificio una vez terminado. Afrontó grandes dificultades y gastos en la confección de la maqueta, pero siguió adelante con el propósito de impresionar favorablemente a sus clientes y llegar a un compromiso satisfactorio. A pesar de todo, el proyecto fue rechazado y decidió "no hacer más maquetas ni dar a conocer nuevos dibujos".

El nuevo intento de Wren consistió en el tosco proyecto de 1674. La tosquedad se ha interpretado como un despectivo gesto del arquitecto hacia sus críticos. Representa un retroceso casi hasta la catedral de Iñigo Jones. Se sabe que los dibujos de este proyecto fueron hechos con prisa, lo que induce a pensar que se basó en proyectos anteriores. Sus biógrafos citan como fuente varios edificios de los siglos XVI y XVII descritos en tratados de arquitectura. Es posible que el proyecto en cuestión sea uno de los primeros dibujos de Wren, modificado para el caso. De todos modos, el diseño cumplió su propósito. Carlos II ordenó el encargo y el comienzo de las obras, autorizándole a Wren introducir algunas modificaciones a lo largo del trabajo. El arquitecto interpretó la autorización con gran amplitud, lo que hace pensar que el último proyecto fuera sólo una tapadera bajo la cual pudiera luego reimplantar muchos elementos de los diseños anteriores.

En la catedral, tal como fue realmente construida, Wren introdujo dos edificios. El interior está modelado en planta y alzado como una basílica medieval, con nave central de bóveda de medio punto flanqueada por las naves laterales de menor altura y arbotantes para descarga de las paredes del claristorio (levantados encima de los arcos formeros junto a los techos de las naves laterales). Ninguno de estos pormenores estructurales es visible desde el exterior, ya que la gran cúpula central parece levantarse sobre una maciza base de dos plantas. Esto se logró con unos muros perimetrales, prolongación de las paredes exteriores de las naves laterales, que ocultan perfectamente los arbotantes. Esta ocultación se ha considerado como un fraude arquitectónico. Algunos opinaron que tales muros, que presentan incluso falsas ventanas, en realidad ciegas, son nada más que pantallas para esconder el claristorio y los arbotantes, soluciones de procedencia gótica, que Wren condenaba en sus escritos de arquitectura.

Estos muros perimetrales son muy pesados, por lo que otros han defendido el proyecto pensando que dichos muros eran algo más que simples pantallas de ocultación. En 1923 Somers Clark, que se encargaba del mantenimiento de la catedral, negó que Wren hubiese "construido media iglesia para ocultar la otra media". Clark argüía que tales muros no eran pantallas, sino contrafuertes. Afirmaba que no sólo daban estabilidad a los bastiones que ayudan a soportar la cúpula, sino que servían también de contrafuertes "para recibir el esfuerzo de las bóvedas de las





naves laterales y el de la nave mayor a través de los arbotantes".

Para intentar averiguar si Wren utilizó algún tipo de cálculo mecánico teórico, nosotros hemos analizado la estructura de un tramo de San Pablo con ayuda de la fotoelasticidad. Se ensayó un modelo de la sección transversal de las naves bajo la simulación de las cargas propias, más el esfuerzo eólico, según los datos que proporcionó la meteorología local, además de pruebas en el túnel de viento. Después se suprimieron del modelo los arbotantes y se repitió el ensayo. Las fatigas en los pilares aumentaron al suprimir los arbotantes, pero pudimos comprobar que los pilares de sólida fábrica de ladrillo (o en los pilares más pequeños hechos de varias fajas de mampostería concertada) podían resistir con éxito el empuje de las bóvedas y el efecto de los más fuertes ventarrones.

Los resultados del ensayo sugieren que los arbotantes son superfluos. No deja de ser curioso que Wren los pusiera allí después de haber escrito que los arbotantes "son la primera causa de la ruina de las catedrales". Es muy posible que Wren creyera que los muros perimetrales eran necesarios para el adecuado sostenimiento de la estructura y que los colocara allí más como contrafuertes que como pantallas. De todos modos, incluso esta hipótesis resulta discutible; pues si Wren creyó estructuralmente necesario algún refuerzo, pudo haber dispuesto pequeños pilares botareles para recibir el peso de cada arco botarete en lugar de pesados muros continuos a lo largo de naves y presbiterio. Estos arbotantes, compuestos de botaretes y botareles, hubiesen conferido a San Pablo el aspecto gótico que no deseaba (su protestantismo influiría en su pensamiento en el aspecto distributivo y en el estructural).

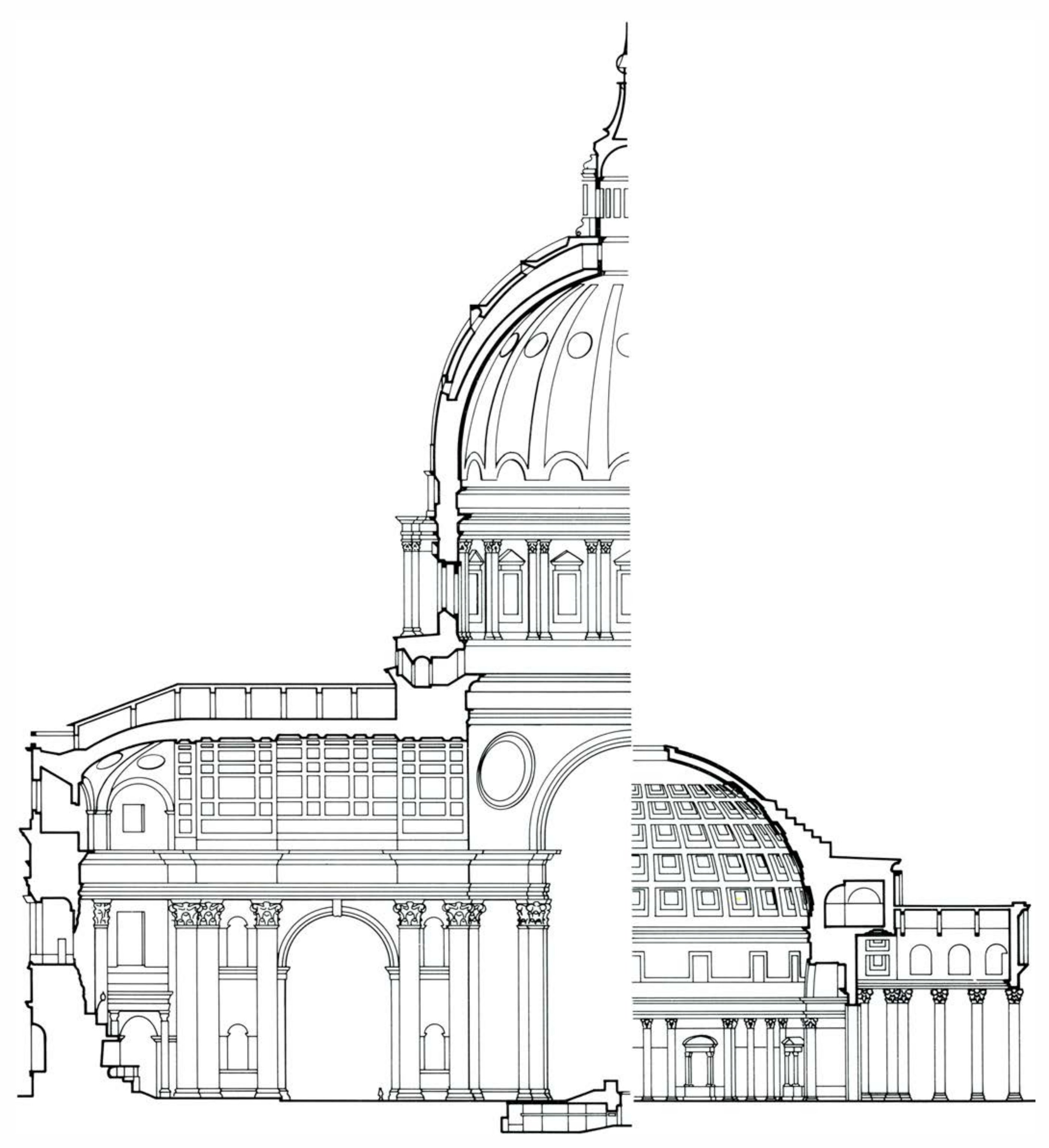
En cuanto a la opinión de Clark de que los muros perimetrales absorben el empuje de las bóvedas laterales, hay

SECCION TRANSVERSAL DEL PRESBITERIO de la vieja catedral de San Pablo (*arriba, a la izquierda*), cuya construcción se inició en 1258, comparada con la obra de Christopher Wren (*arriba, a la derecha*). La solución de Wren es mucho más pesada. Los muros perimetrales simulan exteriormente un basamento de la gran cúpula. Un modelo de la sección (*foto inferior*), sometido a las cargas derivadas del peso muerto de los muros, demuestra que la parte alta de los perimetrales, que oculta los arbotantes, contribuye eficazmente a la estabilidad general de la estructura. El ensayo evidencia que la parte inferior, más pesada que la de muchas catedrales medievales, se halla sobradamente preparada para soportar las fatigas derivadas del peso muerto de la estructura y de los vientos más fuertes; permanecería estable sin los arbotantes.

que hacer constar que la coz de estas bóvedas alcanza a los muros mucho más abajo de su coronación. Aun creyendo que Wren hubiese establecido la mayor altura de los muros (y por tanto un gran peso adicional) pensando en aumentar la estabilidad, la gran altura con que cargó sus macizos y caros muros hace pensar que los empleó principalmente como pantallas.

Para verificar el aserto de Clark de que los muros perimetrales ayudan a estabilizar las construcciones que forman parte del sistema de contrarresto de la gran cúpula, nosotros hemos calculado por separado la cúpula y su estructura sustentante. Wren, durante años, dudó antes de decidirse a preparar su proyecto definitivo de cúpula.

Hasta 1694 aparecen referencias en sus notas acerca de modelos experimentales para la cúpula; todos los bocetos por él preparados hasta 1703 son distintos del modelo final construido. Las dudas de Wren venían del conocimiento de los defectos estructurales observados en la cúpula de San Pedro de Roma. La alta cúpula vaticana, construida entre 1585 y 1590, estaba llena de defectos estructurales desde su co-



LOS PROBLEMAS DE LAS CUPULAS del segundo renacimiento italiano se evidencian comparando la sección de San Pedro del Vaticano (*izquierda*) con el Panteón de Agripa (*derecha*). El extradós de la cúpula del Panteón es relativamente plano y el empuje de su parte alta es recogido por macizos muros circulares. La parte superior de la cúpula de San Pedro, que sostiene la linterna, ejerce un empuje similar. Para absorberlo, sólo está la parte baja de la propia cúpula. Se colocaron diez cadenas, a modo de zuncho, alrededor de la cúpula para aumentar su resistencia, pero el peligro de grietas persiste.

mienzo. La mayoría de los problemas se manifiestan al comparar las cúpulas de San Pedro y la del Panteón de Agripa, levantada el año 120 d.C. En el edificio antiguo, el perfil general es relativamente chato y los empujes de la cúpula son absorbidos por un macizo anillo de fábrica de ladrillo. En San Pedro, la parte superior de la cúpula crea unos empujes semejantes; mas, para absorberlos solamente está la parte inferior de la estructura que se mostró incapaz de soportar tal carga. En consecuencia, la cúpula presenta grietas a lo largo de líneas meridianas. Años más tarde se colocaron diez cadenas de hierro alrededor de los riñones de la cúpula para evitar el fallo de la estructura, pero el problema siguió siendo grave por el propio peso de la cúpula que genera fuerzas importantísimas.

Al proyectar la cúpula de San Pablo, Wren afrontó problemas de otro tipo. Había construido los pilares centrales de la catedral antes incluso de dibujar la cúpula. Los croquis del proceso edificatorio muestran que los pilares estaban ya hechos en 1691, y que en 1696 se comprobó que habían sufrido asientos diferentes por causa de la naturaleza del suelo. Ante esto, optó por una solución sumamente elegante: una cúpula triple extremadamente liviana. El majestuoso cascarón externo es tan sólo una serie de planchas de plomo sostenidas por un armazón de madera. La cúpula intermedia, que no puede verse ni desde el interior de la iglesia ni desde el exterior, es un delgado cono de fábrica de ladrillo que soporta la cúpula exterior y la linterna, pétrea, cuyo peso es de 850 toneladas. La cúpula interna, igualmente de ladrillo, forma un atractivo techo hemiesférico. A diferencia de la cúpula externa de San Pedro, el cono de ladrillo de San Pablo, que carga la mayor parte del peso, se halla compensado por la pesada linterna central. La estructura cónica, en vez de hallarse sometida a fuerzas inclinadas altamente dañinas, trabaja principalmente a compresión.

Una simple cadena alrededor de este cono de San Pablo es suficiente para mantener la integridad de la relativamente ligera estructura contra las fuerzas internas y externas. Los estudios realizados sobre la triple cúpula con ayuda de ordenador indican que las fatigas en la fábrica de ladrillo son generalmente pequeñas, aun teniendo en cuenta los esfuerzos sumados de la gravedad y el viento, y que la cadena se halla situada adecuadamente. Otra cosa es lo concerniente a la estructura sustentante de la cúpula, que hay que des-

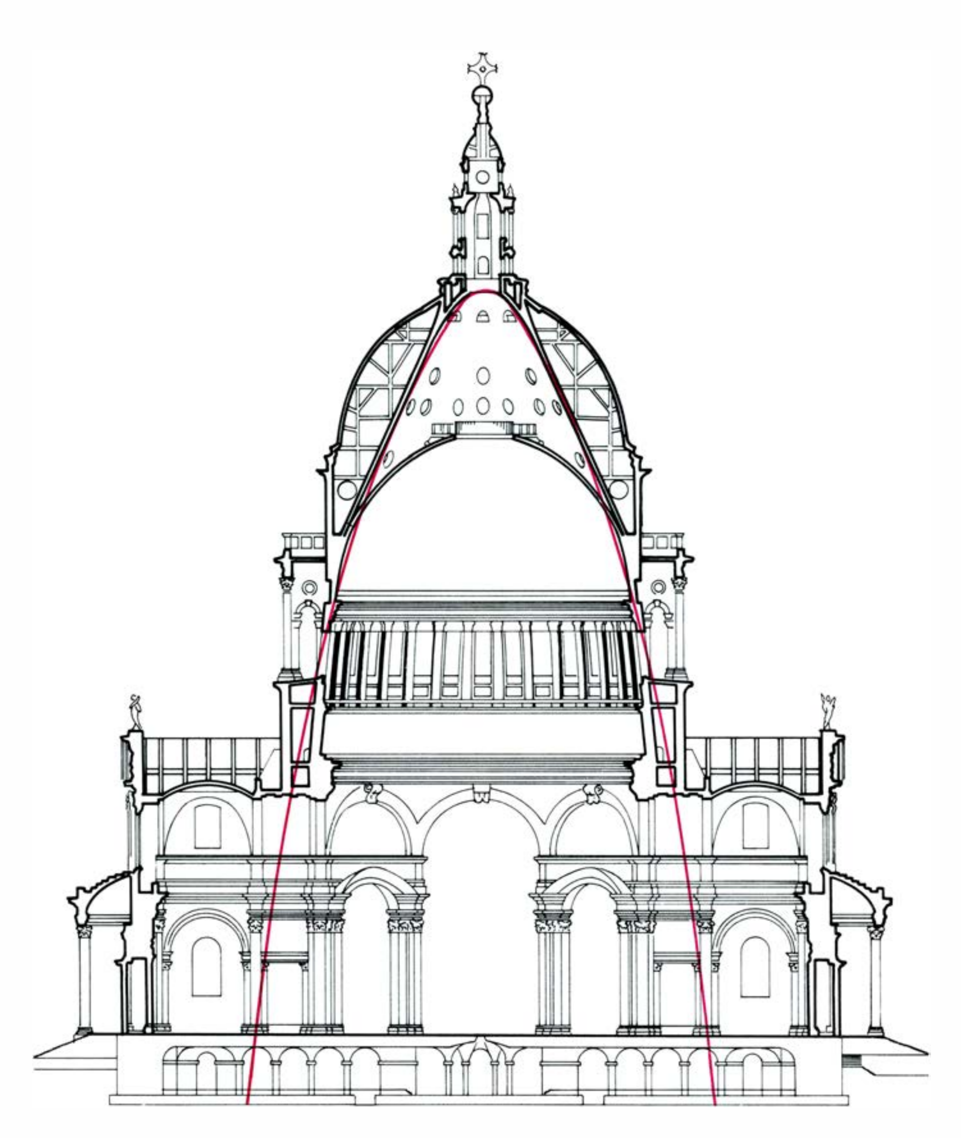


VISTA DEL INTERIOR de la catedral de San Pablo, que pone de manifiesto la pesada estructura característica del estilo barroco. La pesadez de la estructura se evidencia en los pilares de la nave mayor.

ligar de la sustentada. Si Wren hubiese completado el proyecto de la cúpula antes de comenzar la construcción de los pilares de la nave, hubiese podido comprobar que la sección de los pilares hubiera podido ser bastante menor, con lo que los problemas de asientos diferenciales no se hubiesen presentado.

Nuestro análisis contradice la afirmación de Clark, según la cual los muros perimetrales eran necesarios como contrafuertes de la cúpula. En nuestra opinión, tales muros sirven principalmente para crear un efecto estético adecuado y la triple cúpula es al mismo tiempo un triunfo de la estética y la ingeniería.

Si Wren no consiguió relacionar la ciencia de su tiempo con la práctica de la propia arquitectura, no fue porque no lo intentara. En varias notas y en los fragmentarios *Tracts* (Tratados), reunidos por su hijo y por su nieto en el volumen *Parentalia*, afirma sin ambigüedad que la estática científica es la base de la construcción. En 1713 resumió esta actitud en un informe sobre la abadía de Westminster: "A la aplicación de los principios de la estática y a la correcta distribución de las cargas en los estribos de los arcos se debe el éxito de la buena arquitectura". Wren fue más allá de este esquema pragmático teórico y afirmó que donde haya una columna incapaz de resistir las cargas inclinadas que insisten sobre ella, debe incrementarse su resistencia haciéndola más alta y, por tanto, más pesada.



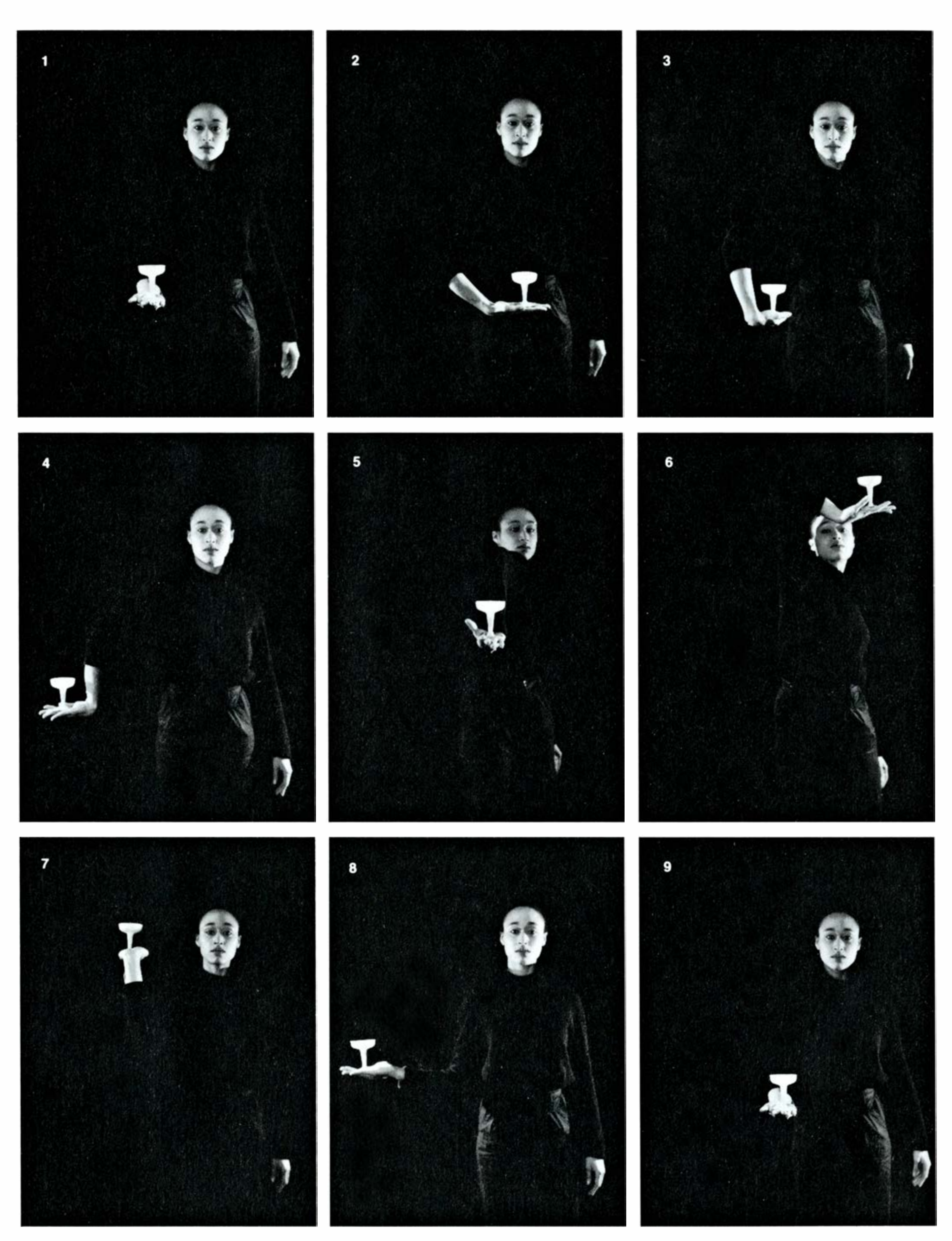
LA TRIPLE CUPULA de la catedral londinense de San Pablo vista en sección transversal por el crucero. El cono de fábrica de ladrillo constituye el soporte intermedio y sostiene la cáscara exterior y la pesada linterna. Debido a la forma cónica, tal linterna contribuye a aumentar la estabilidad. Las cargas derivadas de la linterna en la estructura cónica no se proyectan hacia el exterior, como sucede en San Pedro de Roma, y actúan fundamentalmente a compresión. La línea roja superpuesta tiene forma de catenaria invertida (forma que adopta una cadena suspendida por sus extremos). Robert Hooke, colaborador de Christopher Wren después del incendio de Londres y miembro de la Royal Society, había señalado que una catenaria invertida trabaja solamente a compresión en tanto que la catenaria en su posición normal trabaja solo a extensión. Desde el siglo XIX algunos investigadores han intentado demostrar que su arquitecto se valió de los estudios de Hooke sobre la catenaria, pero no hay pruebas de cosa semejante.

El punto de vista de Wren acerca del lugar que corresponde a la mecánica teórica, y a la preferencia de lo útil sobre lo ornamental, aparece más claramente en un fragmento sin fecha de su *Tract II*. Empieza con algunas consideraciones sobre los cinco órdenes clásicos para componer columnas (dórico, jónico, corintio, toscano y compuesto). Dice que fueron sometidos a "reglas demasiado estrictas y pedantes que no podían transgredirse sin cometer el crimen de la barbarie; si bien, en su propia naturaleza, no son más que la moda y el gusto de las épocas en que fueron aplicados".

Wren vuelve a analizar los arcos en *Tract II*: "Parece poco responsable que la mayoría de los arquitectos que nos han precedido perdieran el tiempo en las cuestiones ornamentales pasando muy ligeramente por encima de los aspectos geométricos, que forman la parte esencial de la arquitectura. Por ejemplo, ¿puede sostenerse un *arco* sin su adecuado estribo? Si el estribo es mayor de lo necesario quiere decir que se gasta material inútilmente; si es demasiado chico, el arco se hunde; y lo mismo puede decirse de las bóvedas. A pesar de ello ningún autor ha escrito reglas sobre tal cosa, ni se han estudiado las diversas formas de los arcos". Wren concluye que la verdadera y universal regla sólo puede deducirse del estudio de la ciencia de la mecánica. "Que esto es cierto", escribió, "se prueba al aplicar la técnica de la determinación de los centros de gravedad de las diferentes partes de la obra sobre los planos del proyecto." Aunque la regla que Wren formuló entonces es incorrecta, puesto que desconocía, entre otras cosas, la componente horizontal del arco, su análisis era una respuesta de mecánica científica al más complicado problema estructural de aquel tiempo.

Es puro anacronismo afirmar que Wren, por haber sentido interés por la ciencia teórica y la arquitectura de su momento, hubiese podido resolver problemas constructivos prácticos aplicando tales teorías. Este arquitecto se halló inmerso en el florecimiento y renovación de las ciencias del siglo XVII con su espíritu práctico y emprendedor, pero aplicó sus conocimientos científicos más en sus tratados y notas que en sus obras.

El empuje de la revolución científica se manifiesta en los esfuerzos de Wren por formular una teoría de los arcos basada en la estática, en la importancia que concedió a la función y a la utilidad en la arquitectura y en su protestantismo intelectual, que le impulsó a aumentar la visibilidad y mejorar la acústica de los edificios.



LOS FIBRADOS pueden expresar una analogía matemática exacta entre los movimientos de la danza filipina Binasuan ("danza del vino") y el efecto mecánico-cuántico de un campo magnético sobre el spin de un neutrón. En la danza, la orientación del vaso, a medida que gira alrededor de un eje vertical, no puede identificarse con la rotación relativa entre el vaso y el cuerpo de la bailarina. Si mantiene fijos los pies, un giro de 360 grados de la mano y del vaso introduce una torsión en el cuerpo de la intérprete. Otra rotación completa de la mano en la misma dirección vuelve la mano y el cuerpo a su posición original. La diferencia de fase genealizada de un neutrón, en un campo magnético, presenta idéntica relación con la orientación de su vector spin.

Fibrados y teoría cuántica

Una rama de la matemática que extiende la noción de curvatura a análogos topológicos de la banda de Möbius puede servir para explicar las teorías vigentes de las interacciones de partículas elementales

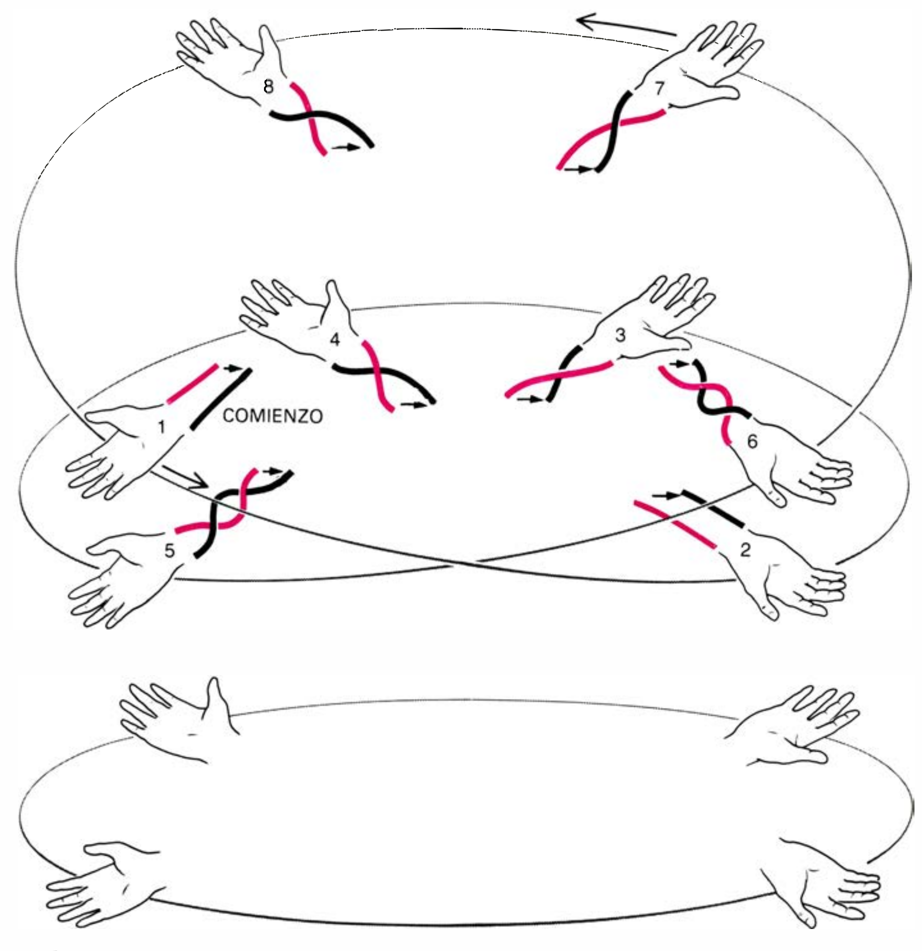
Herbert J. Bernstein y Anthony V. Phillips

La íntima relación que existe entre la matemática y la física puede sorprender al lego en la materia, mas para quienes estén acostumbrados a trabajar en dichos campos se trata de un hecho evolutivo natural. Los problemas físicos han venido estimulando el pensamiento matemático desde la época en que los egipcios introdujeron la geometría como un medio para la medida precisa de la tierra, por lo menos. La invención por Newton del cálculo integral constituyó, en parte, una solución de orden práctico de la dificultad para formular la ley de la gravitación universal. Las series trigonométricas infinitas fueron ideadas para estudiar el flujo del calor. Los modelos abstractos investigados hoy por los matemáticos se basan, aunque algunas veces de modo remoto, en los esquemas reales que presenta el universo de la física.

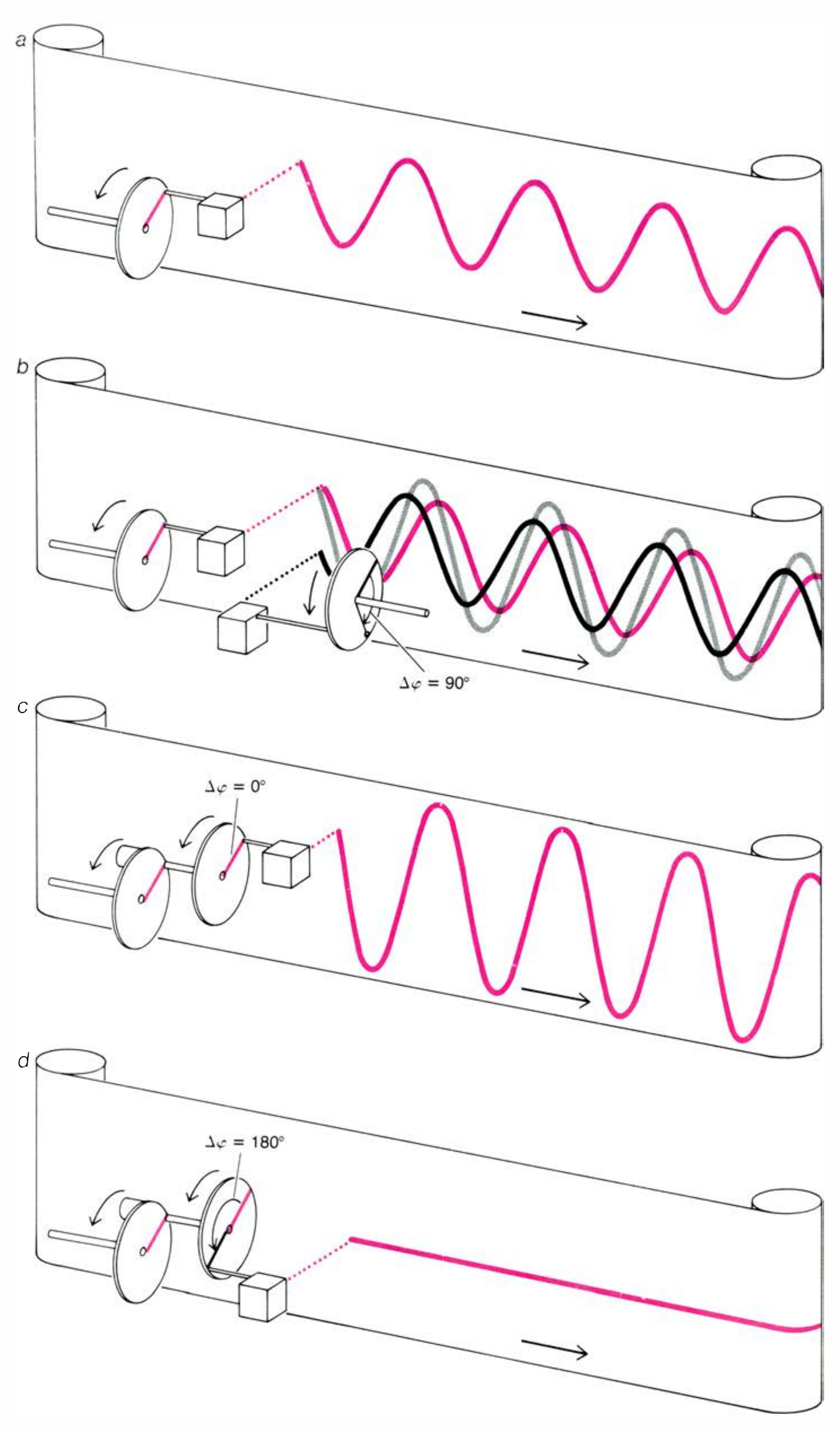
Los matemáticos no han dejado de agradecer amablemente la deuda. Una teoría inventada por matemáticos para tratar cuestiones propias resulta ser muchas veces exactamente lo que los físicos necesitan para sus análisis y predicciones en el ámbito de la naturaleza. El cálculo tensorial, producto de más de cien años de desarrollo por matemáticos como Karl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann y Tullio Levi-Civita, fue esencial para la formulación por Einstein de su teoría general de la relatividad. Los beneficiarios más recientes de estas investigaciones matemáticas son los físicos que estudian las fuerzas y los campos mecánico-cuánticos que intervienen en las interacciones de las partículas elementales.

Los campos más prometedores para estos fines se llaman campos "gauge" o de contraste. Su utilidad radica principalmente en que permiten expresar relaciones subyacentes entre fuerzas que, a primera vista, se dirían muy distintas. Tales campos gauge (o de contraste) han desempeñado un papel importante en intentos recientes por tejer una teoría unificada entre tres de las cuatro fuerzas básicas conocidas en la naturaleza, es decir, entre las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas. Para la cuarta fuerza básica, la gravedad, no existe una teoría mecánico-cuántica, pero la teoría general de la relatividad sugiere que la gravitación puede ser descrita, en última instancia, por una teoría de campo de contraste.

Aunque la idea del campo gauge (o de contraste) fue introducida por Hermann Weyl en la década de los 20, el desarrollo actual de la teoría arranca de 1954, cuando C. N. Yang y Robert L. Mills, que trabajaban entonces en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, aplicaron los conceptos del campo gauge a las fuerzas nucleares. Tras casi 20 años de refinamientos sucesivos, los físicos han logrado expresar la idea de un campo gauge de suerte tal que pudiera reconocerse como un ejemplo de es-



EL FIBRADO QUE RECUBRE DOBLEMENTE representa un conjunto de rotaciones relativas entre la mano de la bailarina y el resto de su cuerpo (*véanse las fotografías de la página anterior*). Las flechas señalan la orientación fija de los pies. El círculo de la parte inferior describe las orientaciones de la mano. Un movimiento a lo largo del círculo motiva otro a lo largo de uno de los segmentos de la curva torsionada directamente encima del círculo. La topología de esta última curva muestra que una rotación relativa de 90 grados, en sentido antihorario, equivale a una rotación relativa de 630 grados en sentido horario.



SOLEMOS REPRESENTAR LA FASE DE LA ONDA por un ángulo, y sólo puede detectarse como la diferencia entre las fases de dos ondas. Para ondas de seno o de coseno podemos trazar la forma ondulatoria proyectando un punto de un círculo, en giro uniforme, sobre una pantalla que se desplaza de modo también uniforme y perpendicularmente a la línea de proyección. Puede elegirse cualquier posición en el círculo por la correspondiente a cero grados. El ángulo de rotación, a partir de la posición arbitrariamente escogida, mide la fase (*a*). La fase relativa entre dos ondas se define perfectamente cuando cada cresta y cada seno (o mínimo) de una onda se hallan separados el mismo número de grados que sus correspondientes en la segunda onda. Cuando las ondas interfieren, sus amplitudes se suman en cada instante y la altura del máximo resultante depende de la fase relativa (*b*). La suma puede realizarse, automáticamente, centrando el segundo movimiento circular en el perímetro del primero. Si la interferencia es constructiva (*c*), las crestas coinciden y los senos (o mínimos) también; por ello, la altura máxima es la resultante de las sumas de las alturas de las ondas originales. Si la interferencia es destructiva, lo que corresponde a una diferencia de fase de 180 grados (*d*), las crestas coinciden con los senos y las ondas se anulan exactamente.

tructuras más abstractas, las llamadas por los matemáticos conexiones en fibrados. El descubrimiento de esta equivalencia ha hecho posible la aplicación de conceptos matemáticos elaborados y potentes a la descripción de la realidad física.

¿Qué es un campo gauge (o de contraste)? ¿Qué son los fibrados y de qué modo intervienen en la física? ¿Qué significa que un fibrado tenga una conexión? ¿Cómo relacionar la noción de conexión con la de campo gauge? Vamos a intentar responder las preguntas mediante el examen de dos experimentos físicos. Muestra uno de ellos lo que sucede a los neutrones cuando giran 360 grados por efecto de un campo magnético; el otro revela el efecto de un campo magnético en dos haces parciales de electrones, cuando actúa en la región que existe entre ambos. Cada experimento demuestra, de manera distinta, cómo puede aparecer un fibrado en la teoría cuántica. En el experimento de la rotación del neutrón, importa la estructura global del fibrado; mientras que en el experimento del haz de electrones el hecho central lo constituye una conexión, una estructura intrínseca local que puede imponérsele al haz. La conexión representa un ejemplo elemental, aunque fundamental, de un campo gauge.

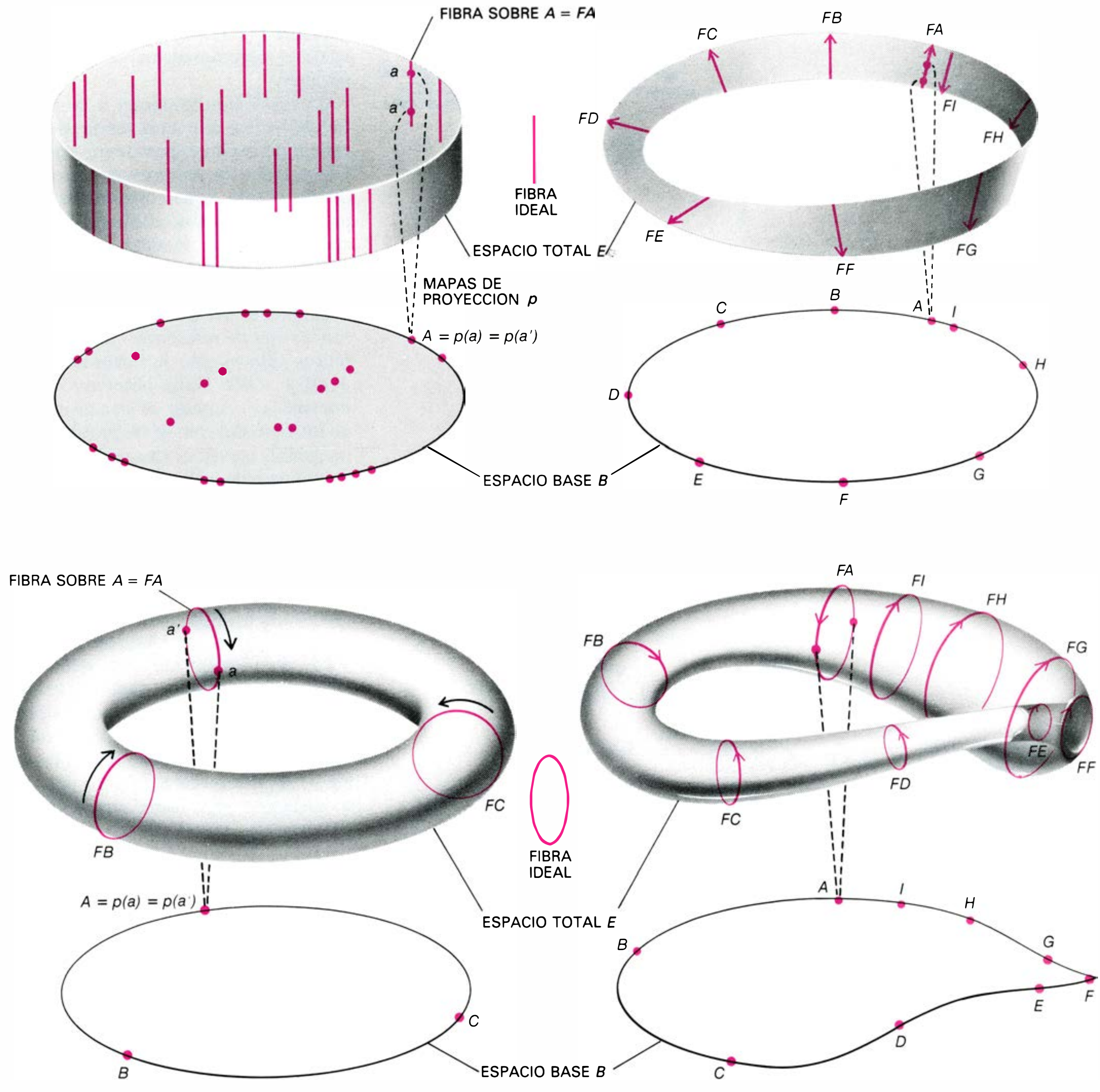
El estudio de fibrados es una parte de la rama de la matemática llamada topología, lo que no empece que se hayan investigado también los haces en la geometría diferencial en virtud de su relación con el concepto geométrico de curvatura. Se profundizó en la idea de conexión en un fibrado, al intentar generalizar la noción de curvatura de una superficie bidimensional, como la de la tierra, a una curvatura de un espacio con tres o más dimensiones. Así pues, otra forma de expresar la diferencia matemática entre ambos experimentos, de los que vamos a ocuparnos, consiste en señalar que el experimento de la rotación del neutrón se refiere a la topología del fibrado, mientras que el del haz de electrones concierne a la geometría del fibrado.

El experimento de la rotación de 360 grados del neutrón lo propuso uno de nosotros (Bernstein) en 1967. Casi simultáneamente, Yakir Aharonov y Leonard Susskind, de la Universidad de Yeshiva, describieron un experimento similar. El experimento pone de manifiesto un efecto altamente contraintuitivo, cuyo equivalente matemático es la unilateralidad de una banda de Möbius. El punto a debatir es el spin

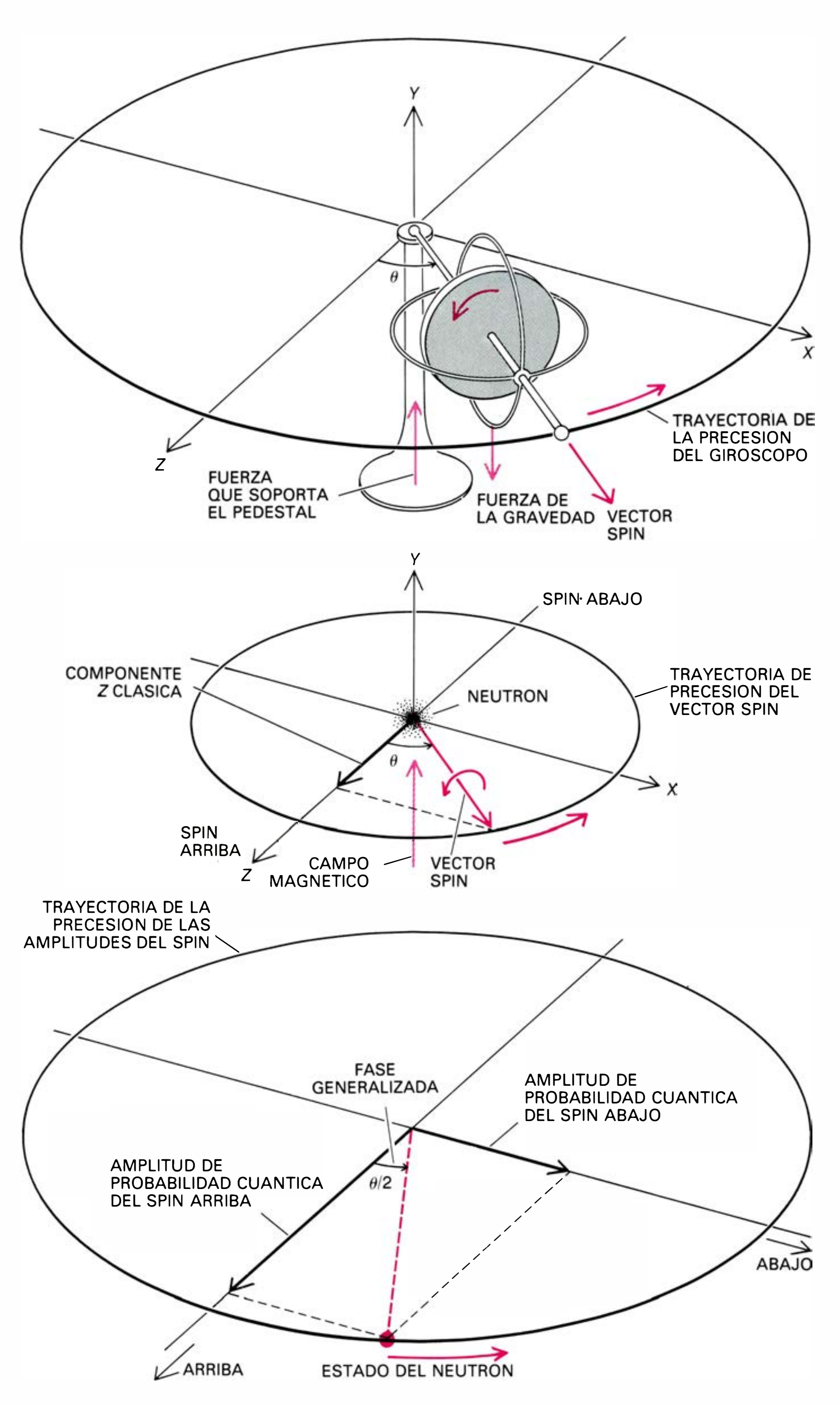
o momento angular intrínseco de una partícula subatómica. De acuerdo con la teoría cuántica, el neutrón u otra partícula con spin no puede retornar a su estado inicial cuando su orientación ha girado 360 grados. Necesita dos vueltas completas, es decir, una rotación de 720 grados para restaurar el estado de la partícula en sus condiciones iniciales.

Para entender el experimento hay que tener algunas nociones de la teoría cuántica del spin. Los físicos han extrapolado el concepto del momento angular intrínseco de spin (o de giro) de una peonza, o de un giróscopo, al dominio de las partículas elementales. En todos los casos, el spin es una entidad vectorial, lo que significa que tiene no sólo una magnitud, sino también una dirección. Por convenio, el vector apunta, a lo largo del eje del spin, hacia una dirección determinada por la así llamada regla de la mano derecha. Si los dedos de esta mano se cierran como si agarrasen el eje, girándolos en el sentido del spin, el pulgar señalará la dirección del vector que caracteriza a éste.

A diferencia de lo que ocurre con el spin de un trompo o de un giróscopo, el



UN FIBRADO consta de un espacio base, un espacio total y un mapa que proyecta cada punto del espacio total sobre un punto del espacio base. El conjunto de todos los puntos del espacio total que se proyectan sobre el mismo punto en la base constituye una fibra (*líneas y círculos de color*). El espacio total puede parecerse a una gavilla o haz de fibras. Las fibras del fibrado deben tener la misma estructura topológica; por cuya causa todas las fibras pueden representarse mediante una fibra simple ideal. Para el cilindro sólido (*arriba, a la izquierda*) o la banda de Möbius (*arriba, a la derecha*), las fibras son líneas rectas sobre los puntos de la base, mientras que para el toro (*abajo, a la izquierda*) o para la botella de Klein (*abajo, a la derecha*), las fibras correspondientes a cada punto son círculos. Los movimientos registrados en la base pueden modificar la orientación de las fibras, de acuerdo con la estructura topológica del espacio total. Un circuito a lo largo del camino en la base cambiará la orientación de las fibras en la banda de Möbius y en la botella de Klein, pero la orientación de las fibras en el toro y en el cilindro no se alterarán por un movimiento a lo largo de uno de esos caminos. Al desplazarse de fibra a fibra en la botella de Klein, ésta aparece pasando a través de sí misma. Autointersección que no puede salvarse en una representación tridimensional.



PRECESION DEL VECTOR SPIN DE UN NEUTRON en un campo magnético. Se asemeja a la precesión de un giróscopo en un campo gravitatorio. El par magnético sobre el neutrón giratorio causa su precesión, en un valor que es proporcional a la magnitud del campo e independiente de la orientación del neutrón. Si la dirección inicial del vector spin del neutrón se denomina "arriba" y si el campo es perpendicular a él, la precesión para un ángulo de 180 grados hará que el vector spin señale "abajo". Para ángulos intermedios, la física clásica predice que la componente del vector spin medida a lo largo del eje *z* es igual a la proyección perpendicular del vector sobre dicho eje. En mecánica cuántica, la componente del spin medida a lo largo de cualquier eje sólo puede valer $+1/2$ o $-1/2$, multiplicado por la constante de Planck $\hbar$. Lo que cambia durante la precesión es la probabilidad de detectar el neutrón en la posición "arriba" ($+\hbar/2$) o "abajo" ($-\hbar/2$). Las probabilidades se determinan elevando al cuadrado la amplitud de la probabilidad, cuyo valor puede ser positivo o negativo. De aquí que la precesión mecánico-cuántica de un neutrón pueda representarse como una rotación del estado del neutrón en un espacio abstracto, cuyos ejes coordenados sean las amplitudes de probabilidad de los estados "arriba" o "abajo" del vector spin.

que corresponde a una partícula elemental está cuantificado, es decir, su magnitud puede adquirir sólo ciertos valores discretos, que son múltiplos del menor de ellos. Cada partícula posee un spin de determinada magnitud, que no cambia nunca y constituye una de las propiedades intrínsecas que definen su propia identidad. El electrón, el protón y el neutrón (además de algunas otras partículas) tienen la mínima cantidad de spin permitida distinta de cero. Este mínimo es igual a $\hbar/2$, donde $\hbar$ representa la constante de Planck, cuyo valor es aproximadamente 10^{-27} erg-segundo.

La restricción impuesta a la magnitud del vector spin en la teoría cuántica refleja un hecho experimental curioso. Como todos los vectores, el correspondiente al spin tiene componentes a lo largo de los ejes de cualquier sistema coordenado que se elija. Un experimentador debe seleccionar un eje particular, a lo largo del cual pueda medir la componente del spin. Sean cuales fueren los ejes de referencia escogidos, los únicos valores que se encuentran son $+\hbar/2$ y $-\hbar/2$. No se observan valores intermedios. A pesar de esta propiedad no intuitiva del spin de las partículas, la imagen de un vector spin continúa siendo útil para describir los neutrones. Podemos polarizar los spin de una serie de neutrones, de forma que, idealmente, los vectores apunten a la misma dirección. El experimentador puede determinar la dirección, girando el eje utilizado en la medida, para hacer máxima la probabilidad de detectar el valor $+\hbar/2$. Si se hallan todos los neutrones en el mismo estado, darán el mismo resultado. Por razones de comodidad, el eje de referencia a lo largo del cual se polarizan los spin puede denominarse eje *z*; los dos posibles estados del spin se designan spin hacia arriba ($+\hbar/2$) y spin hacia abajo ($-\hbar/2$).

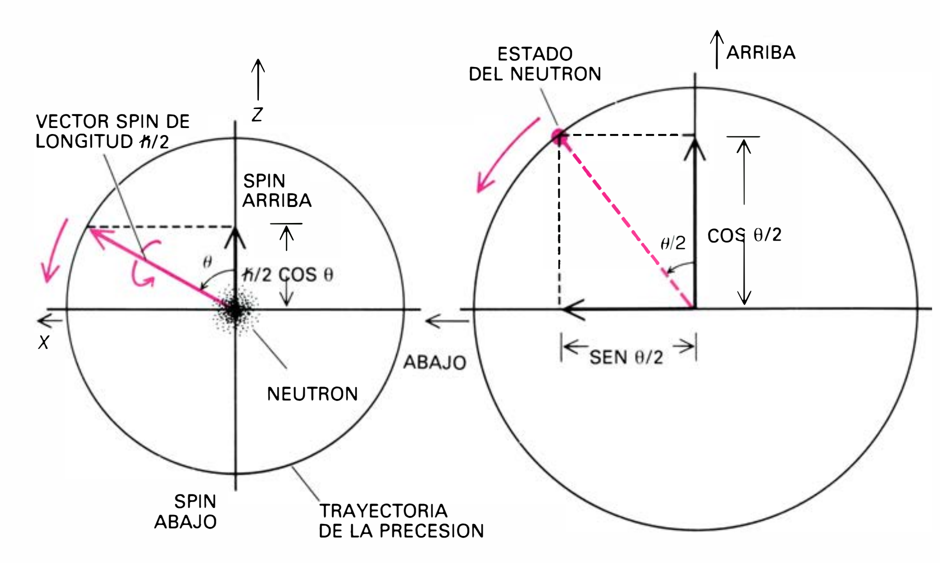
Supongamos que el vector spin de cada neutrón dentro de la serie gira con relación al eje de referencia fijo. La componente a lo largo del eje *z* no puede cambiar continuamente, ya que las medidas sólo dan dos valores discretos $+\hbar/2$ y $-\hbar/2$. Pero sí comienzan a cambiar las probabilidades de encontrar neutrones con spin hacia arriba o con spin hacia abajo. En el estado inicial del vector spin, la probabilidad de hallar un neutrón con spin hacia arriba es 1, y nula, la de hallar un neutrón con spin hacia abajo. Después de haber girado el vector spin un cuarto de vuelta, es decir, 90 grados a partir del eje *z*, el modelo clásico (no mecánico-cuántico)

predice la desaparición de la componente z. El vector spin estará orientado de tal modo que no apunte ni para arriba ni para abajo a lo largo del eje z. En el caso de los neutrones, sin embargo, no se encuentra nunca un spin nulo. De acuerdo con el modelo mecánico-cuántico, una rotación de 90 grados cambia el estado del neutrón a otro en que la probabilidad del spin hacia arriba, o la del spin hacia abajo, es 0,5.

El resultado armoniza la cuantificación del spin con la descripción clásica. Si se miden las componentes, según el eje z, de una serie de neutrones, mientras sus vectores spin están orientados perpendicularmente a dicho eje, la mitad tendrán spin $+\hbar/2$, y la otra mitad, spin $-\hbar/2$. Y así, la suma de las componentes medidas será cero; su valor medio está de acuerdo, pues, con la teoría clásica.

De un modo similar, una rotación de 180 grados orienta los neutrones con su vector spin hacia abajo. Esto hace que la probabilidad del spin hacia arriba sea nula y la del spin hacia abajo sea 1. Después de haber girado el neutrón una circunferencia completa, la probabilidad del spin hacia arriba (la probabilidad de encontrar la componente z del spin igual a $+\hbar/2$) vuelve a ser 1, y nula, la probabilidad del spin hacia abajo.

Los físicos han erigido la distinción de los estados del spin y sus probabilidades en postulado básico de la teoría cuántica. Las probabilidades se calculan a partir de la descripción matemática de cada estado de una partícula como una función de onda. En cada punto del espacio existe un número que se denomina amplitud de probabilidad de la función de onda del neutrón para cada estado distinto. El término amplitud se refiere a las ondas, a través de las cuales la teoría cuántica describe las partículas materiales. Una amplitud de probabilidad puede ser positiva o negativa; y refleja la capacidad observada de las ondas para superponerse de modo constructivo o destructivo. La probabilidad de encontrar una partícula en un estado dado es el cuadrado de la correspondiente amplitud de probabilidad. Elevando al cuadrado la amplitud, se asegura que la probabilidad sea siempre un número positivo.



VECTOR SPIN DE UN NEUTRON. Que dicho vector tenga precesión no significa que la geometría de la misma pueda describirse, de un modo coherente, por el modelo clásico (*a la izquierda*); en efecto, el spin medido a lo largo de cualquier eje da sólo los valores $+\hbar/2$ o $-\hbar/2$. En mecánica cuántica, la precesión se manifiesta como un cambio en la probabilidad de hallar un neutrón con un spin $+\hbar/2$ ("arriba") o con $-\hbar/2$ ("abajo"). Las dos amplitudes que determinan la probabilidad pueden considerarse coordenadas de un espacio abstracto cuyos ejes se caracterizarán "arriba" o "abajo" (*derecha*). Tras una precesión de 90 grados respecto del eje z, el vector spin no apunta ni hacia arriba ni hacia abajo. Si se mide la componente z del vector, hallaremos, la mitad de las veces, el spin "arriba", y la otra mitad, el spin "abajo". El valor medio del spin será, por ende, nulo, en cabal concordancia con el resultado clásico. Por ser las probabilidades iguales, las amplitudes pueden tomarse iguales; el punto correspondiente en el espacio del estado de neutrones gira 45 grados respecto del eje "arriba". La precesión en un ángulo θ origina un corrimiento de la fase generalizada de $\theta/2$, representada como una rotación en el espacio del estado de neutrones.

Puesto que el neutrón tiene dos estados de spin distintos, la descripción completa de un neutrón en un punto del espacio posee dos números, que indican la amplitud de probabilidad para el spin hacia arriba y la correspondiente para el spin hacia abajo. Una forma de mostrar las amplitudes, que respete la distinción entre los dos estados, consiste en representarlos en ejes perpendiculares, bautizados "arriba" y "abajo", en un espacio abstracto llamado espacio del estado neutrónico [*véase la ilustración de esta página*]. Podemos señalar el estado del neutrón por un punto en la gráfica. Si el estado inicial del spin es "arriba", la amplitud de probabilidad del spin arriba será +1 y la del spin "abajo", nula. Esta combinación de valores corresponde a un punto que dista una unidad del origen a lo largo del eje "arriba".

A medida que se cambia la orientación del spin del neutrón, las dos amplitudes de probabilidad varían continuamente. Sin embargo, por ser el spin "arriba" y el spin "abajo" los dos únicos estados posibles, la suma de las dos probabilidades deberá ser siempre 1. Por tanto, la suma de los cuadrados de las amplitudes de probabilidad del spin "arriba" y del spin "abajo" deberá ser 1 y el punto representativo del estado del neutrón hallarse en un círculo de radio unidad. Todo estado posible del neutrón puede describirse por el ángulo que, con el eje "arriba", forma el punto correspondiente. Este ángulo se denomina fase generalizada del estado del neutrón.

Después de una rotación de 90 grados del vector físico del spin alrededor del eje z, las amplitudes de probabilidad del spin hacia arriba y del spin hacia abajo serán iguales en valores absolutos, ya que la probabilidad correspondiente debe ser, para cada una de ellas, igual a 0,5. Por consiguiente, el punto del espacio del estado de neutrones se encuentra a mitad de camino entre los ejes "arriba" y "abajo". De lo que se sigue que la fase generalizada del estado del neutrón ha cambiado en 45 grados como resultado del giro de 90 grados del vector spin del neutrón.

La relación del semiángulo continúa. Cuando el vector físico del spin ha girado 180 grados, apunta hacia abajo: la probabilidad del spin "abajo" es +1 y, cero, la del spin hacia arriba. El punto correspondiente en el espacio de estados del neutrón se encuentra a 90 grados de la dirección inicial. Después de 360 grados de rotación física ambas amplitudes de probabilidad cambian su signo. Hacen falta dos vueltas completas, o 720 grados de rotación, para restaurar las amplitudes de probabilidad a sus estados iniciales.

A primera vista, estos datos de la mecánica cuántica parecen paradójicos. Cuando un objeto ordinario realiza una rotación completa en el espacio vuelve al mismo estado de partida. El cuerpo de una persona, o un giróscopo en movimiento, no cambia por una rotación de 360 grados alrededor de un eje. Tan profundamente arraigado se halla el hecho en la experiencia común,

que, a pesar de tener la teoría del spin del neutrón más de 50 años, había muchos físicos antes de 1967 que pensaban que un giro de 360 grados no podía tener consecuencias directamente mensurables. La teoría cuántica exige que no pueda medirse, de un modo directo, una amplitud de probabilidad y que el cambio de signo de la amplitud causado por esta rotación desaparezca cuando la amplitud se eleve al cuadrado para medir la probabilidad.

Hay, por otro lado, circunstancias en el dominio de los objetos macroscópicos en que la rotación de 360 grados muestra un efecto observable. Por ejemplo, si dos objetos están unidos entre sí por una cinta flexible, es obvio que un giro completo de un objeto no lleve el sistema a su estado original. La cinta queda retorcida en su extremo. Lo que ya no es tan obvio es que un segundo giro completo en la misma dirección pueda llevar el sistema a su estado inicial: la cinta puede desenrollarse, aun cuando la rotación relativa de los dos objetos no comporte un cambio posterior. El mismo efecto puede ponerse de manifiesto con una copa de vino, sosteniéndola en la palma de la mano y girándola alrededor de su eje vertical (sin mover todo el cuerpo). Tras un giro de 360 grados, la copa adquiere su orientación original, pero el brazo se ha retorcido: un giro posterior de 360 grados hace retornar la copa y el brazo a sus posiciones iniciales [*véanse las fotografías de la página 90*].

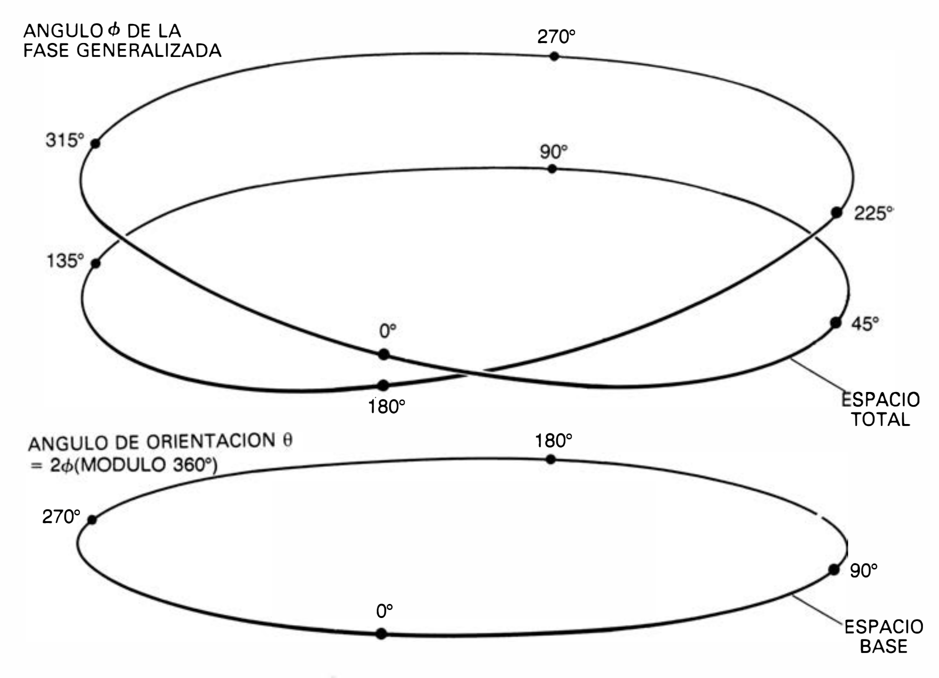
Todos estos fenómenos, tanto macroscópicos como mecánico-cuánticos, pueden representarse por las propiedades de un fibrado simple. Se entiende por fibrado una estructura matemática que consta de dos conjuntos de puntos distintos, llamados espacio base B y espacio total E, y una regla p, denominada mapa de proyección, que asocia un punto en B con todos los puntos en E. En el modelo de fibrado de la rotación de la copa de vino, los puntos del espacio base representan las posibles orientaciones del vaso y de la mano. Los puntos del espacio total representan la rotación que la mano ha llevado a cabo respecto del resto del cuerpo. El mapa de proyección define una asociación entre cada rotación y la orientación relativa determinada por la rotación.

En el modelo de fibrado de la rotación del spin del neutrón, los puntos del espacio base representan la orientación del vector spin. En la parte del efecto que venimos detallando, el vector gira en un plano fijo; y así, cualquier orientación puede describirse por el ángulo que forma con el eje z. (Pueden tratarse análogamente otras posibilidades.) Los puntos del espacio total representan las fases generalizadas del estado del neutrón; corresponden, pues, a puntos del círculo unidad en el espacio de estados del neutrón con las coordenadas "arriba" o "abajo". Cada punto de éstos puede definirse por su distancia angular respecto al eje "arriba". El mapa de proyección asigna, a cada punto del espacio total, uno del espacio base, de acuerdo con la regla $p(\phi) = 2\phi$ (módulo 360). La aplicación de la regla es equivalente a envolver el círculo de las fases generalizadas dos veces alrededor del círculo de las orientaciones, de tal modo que sean posibles dos fases, ϕ y $\phi + 180$ grados, para cada orientación.

Para expresar la correspondencia entre puntos del espacio total y puntos del espacio base, suele considerarse que el espacio total se encuentra "sobre" la base. En esta representación, el punto o puntos del espacio total que el mapa de proyección asocia con un punto en la base se halla verticalmente por encima de éste. Se llama fibra al conjunto de puntos del espacio total sobre un punto de la base. La definición de un fibrado requiere también que las fibras, sobre dos puntos cualesquiera, sean topológicamente equivalentes, de suerte que la estructura topológica de la fibra no varíe de un punto a otro de la base. En algunos casos, la fibra sobre cada punto en la base constituye una línea, morfología que ha dado origen al nombre de haces de fibras o fibrados; cuando las fibras son líneas, el espacio total semeja un haz de fibras. En general, y por ser topológicamente equivalentes, esas fibras pueden describirse como réplicas de una sola, F, o fibra ideal del fibrado.

La fibra ideal del haz que representa la rotación del spin del neutrón es un espacio que consta de dos puntos distintos. Así, sobre el punto caracterizado como de 0 grados en la base, existen dos puntos en el espacio total que corresponden a las fases generalizadas de 0 y de 180 grados, respectivamente. Por ello, la fibra sobre los 0 grados será el conjunto que comprende desde los 0 grados hasta los 180 grados en el espacio total. De modo similar, la fibra sobre los 90 grados será el conjunto que comprende desde los 45 grados hasta los 225 grados en el espacio total. En este fibrado, tanto el espacio total como el espacio base equivalen topológicamente a un círculo. El mapa de proyección corresponde a la forma en que el borde de la banda de Möbius se proyectaría en un círculo del centro de la banda.

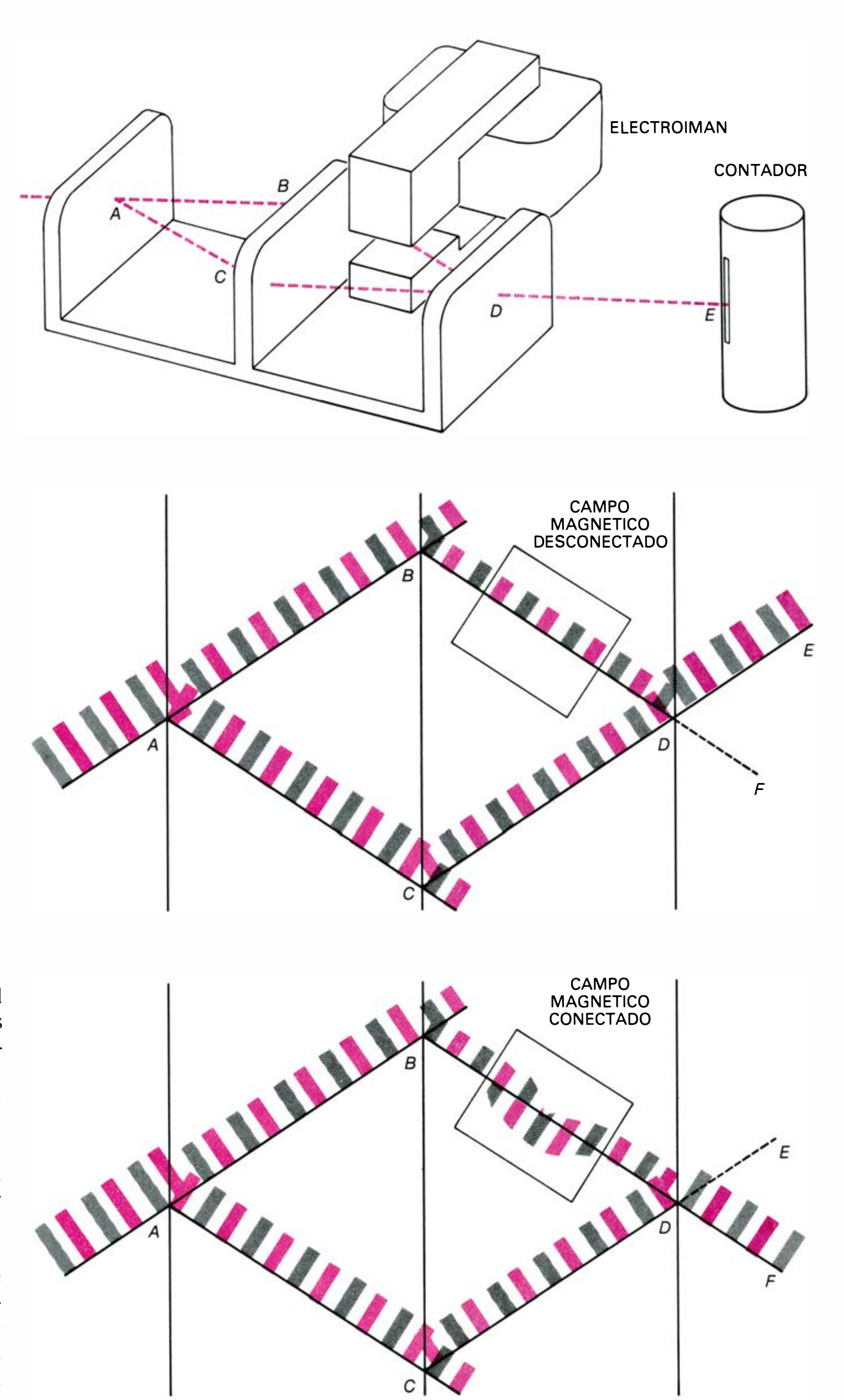
¿De qué manera el modelo de fibra-



FIBRADO DE LOS DESPLAZAMIENTOS DE FASE. Muestra la relación que existe entre la precesión angular de un neutrón y el corrimiento de fase generalizada del estado del spin del neutrón. Los puntos del espacio base del haz representan la orientación del vector spin de un neutrón. Los puntos del espacio total simbolizan los corrimientos de fase relativa en el espacio del estado de neutrones que corresponden a una orientación dada. Por ejemplo, el mapa de proyección del haz asigna los puntos 45 y 225 grados en el espacio total al punto de 90 grados en la base. Ello significa que los ángulos de la fase generalizada de 45 y 225 grados corresponden ambos a una orientación del vector spin de 90 grados con relación al eje *z*. La topología del espacio total muestra, sin embargo, que, cuando se alcanza una diferencia de fase de 225 grados, se requiere una precesión de 450 grados en la base, lo que corresponde a una vuelta y cuarto.

do de la rotación del spin del neutrón representa la relación entre la rotación y el corrimiento de la fase generalizada? Supongamos que un neutrón parte con su vector spin apuntando a lo largo del eje z positivo ($\theta = 0$), de suerte que su amplitud de probabilidad del spin "arriba" sea +1, y 0, la del spin "abajo". (Lo que describe el punto $\phi = 0$ en el círculo unitario del espacio abstracto de los estados del spin de los neutrones.) Ahora bien, si se gira físicamente el vector spin 90 grados con relación al eje z, terminando en $\theta = 90$ grados, y de acuerdo con nuestro análisis anterior, el punto del círculo de la fase generalizada se habrá desplazado a $\phi = 45$ grados. Si el vector del spin gira otros 90 grados, a $\theta = 180$ grados, el punto del círculo de las fases se mueve hasta $\phi = 90$ grados. Podemos describir la correspondencia entre las rotaciones y desplazamientos de fases generalizadas diciendo que el punto en el círculo de las fases se mueve continuamente, de suerte que se halla siempre por encima del punto del círculo de orientación. Juntamente con la estructura topológica del fibrado, este principio geométrico interviene en el cambio de signo del estado del neutrón como el efecto de una inversión en la fase. Una rotación completa de la base debe desplazar la fase generalizada hasta la situación opuesta a la preexistente [*véase la ilustración de la página anterior*].

¿Cómo hacer girar 360 grados el vector spin de un neutrón? Las instalaciones experimentales en uso utilizan las propiedades magnéticas de partículas eléctricamente neutras. Además de momento angular del spin, el neutrón posee momento magnético, que hace que se asemeje a una barra magnética capaz de oscilar alrededor de su eje norte-sur. Supongamos que el vector spin de un neutrón está inicialmente alineado con el eje z, y que se introduce un campo magnético perpendicular a dicho eje. El par que trata de alinear una barra magnética con un campo externo induce una precesión en el imán giratorio en relación con la dirección del campo. El vector spin del neutrón tendrá esta precesión en un plano perpendicular al campo magnético (al igual que ocurre con el movimiento de precesión de un giróscopo en rotación, en respuesta a la atracción de la gravedad). Así pues, para girar el vector spin de un neutrón respecto del eje z puede aprovecharse su momento magnético. Aun cuando el campo magnético no sea perpendicular al spin inicial, la precesión del neutrón será pro-



INTERFEROMETRO DE NEUTRONES cortado de un monocristal perfecto de silicio; tiene tres "orejas" prominentes [que hemos llamado caras en el texto]. Cada oreja divide un haz de neutrones en un haz parcial difractado y en otro transmitido. En este experimento, un haz parcial atraviesa un campo magnético, donde los vectores spin de los neutrones rotan, desplazándose la fase generalizada del estado de neutrones. Al recombinarse, los dos haces parciales interfieren de acuerdo con la diferencia de fase que existe entre ellos. Si el campo magnético es cero, no hay diferencia de fase y los haces interfieren de modo constructivo. Si el campo magnético gira uno de los haces 360 grados, la diferencia de fase entre los dos caminos será de 180 grados y el haz interferirá de forma destructiva en el contador *E*. Las crestas de las ondas neutrónicas se representan por franjas coloreadas y los senos (o mínimos) por franjas grises. Las amplitudes de probabilidad de los estados del spin se indican por la longitud relativa de las franjas. Como el efecto se representa para un neutrón incidente con el spin "arriba", la amplitud de probabilidad no nula del spin "abajo" se muestra por debajo de la línea negra sólo en la región del campo magnético. Las amplitudes de probabilidades negativas se muestran convirtiendo las crestas en senos (o mínimos) y viceversa. El esparcimiento de los neutrones en cada "oreja" se representa por un desfase de 90 grados (salto de una franja) cada vez que un haz de neutrones se difracta y no hay desfase cuando se transmite.

porcional al valor del campo magnético y no dependerá de la orientación del neutrón. Por eso, todos los neutrones de un haz no polarizado que atraviesan un campo magnético tienen el mismo valor en su precesión, valor que se denomina frecuencia de Larmor.

Pero no basta con disponer de un procedimiento para girar los neutrones 360 grados. Hay que poder comparar las amplitudes de probabilidad de un neutrón girado con las amplitudes correspondientes al estado original. Las amplitudes, tanto para los estados girados como para los no girados, tienen la misma magnitud, aunque signos opuestos. Puede detectarse la diferencia en el signo, ya que, en mecánica cuántica, cabe hacer llegar una partícula al mismo punto del espacio por dos caminos diferentes, en el sentido de que existe una probabilidad distinta de cero para detectar la partícula a lo largo de cualquiera de los dos caminos. Como siempre, las probabilidades vienen dadas por los cuadrados de las amplitudes en cualquier punto del camino. En un punto donde dos caminos contribuyan a la probabilidad de detectar la partícula, la amplitud de probabilidad será la suma de las amplitudes correspondientes a cada uno de los caminos. La suma deberá hacerse antes de elevar la amplitud al cuadrado para obtener la probabilidad. Esta regla, que incorpora el fenómeno de la interferencia cuántica, suministra un método para demostrar el cambio de signo asociado a una rotación de 360 grados. El desarrollo reciente de un interferómetro de neutrones ha hecho posible separar un haz de neutrones: las partículas siguen así dos caminos y pueden recombinarse, posteriormente, los haces parciales. Se pueden girar los vectores spin de los neutrones en un haz, pero no en el otro. Cuando la rotación relativa es de 360 grados, cambia el signo resultante, lo que se manifiesta por la interferencia destructiva de los dos haces parciales.

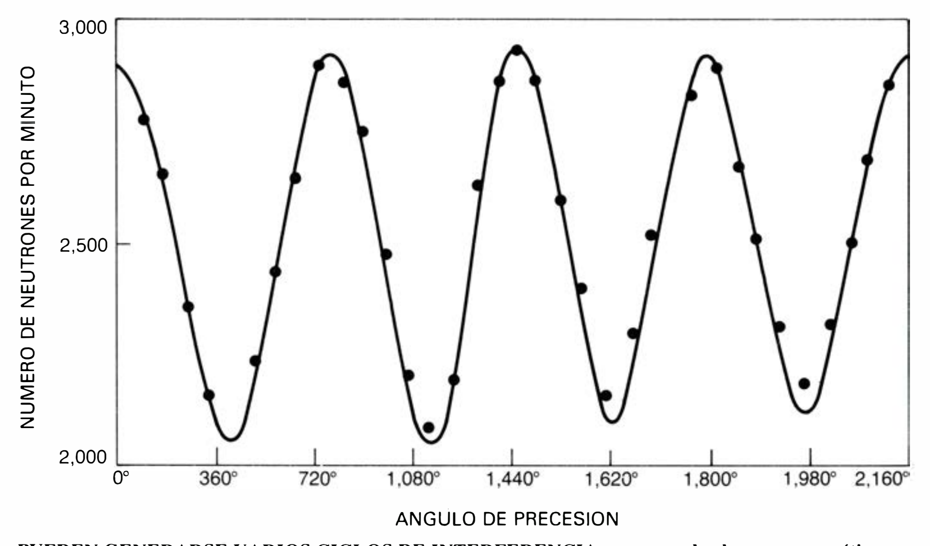
En los experimentos para detectar las rotaciones de 360 grados de los neutrones han intervenido varios grupos. Helmut Rauch, Ulrich Bonse y sus colegas demostraron, por primera vez, el efecto en 1975, en el Instituto Laue-Langevin de Grenoble. Un grupo americano dirigido por Samuel A. Werner, de la Universidad de Missouri, llevó a cabo una demostración similar casi al mismo tiempo. En 1976, de nuevo en el Instituto Laue-Langevin, Anthony Klein y G. I. Opat, de la Universidad de Melbourne, emplearon una técnica original de difracción de Fresnel para mostrar el efecto de la rotación del neutrón.

La parte más importante de un interferómetro de neutrones típico es un cristal cilíndrico, perfecto, de sílice; está cortado de modo que tres planos de caras ("orejas") pulidas se levanten sobre una sola base. Cuando un haz de neutrones incide en la primera cara bajo un ángulo adecuado, se divide en dos haces parciales, uno transmitido y otro difractado. En la segunda cara, vuelve a dividirse uno de estos haces y, en la tercera, se recombinan dos haces parciales. Los dos haces interfieren, constructiva o destructivamente, de acuerdo con su fase generalizada. El haz recombinado se divide de nuevo y, por medio de contadores o detectores colocados detrás de la tercera cara, se cuenta el número de neutrones de cada uno de los dos haces parciales.

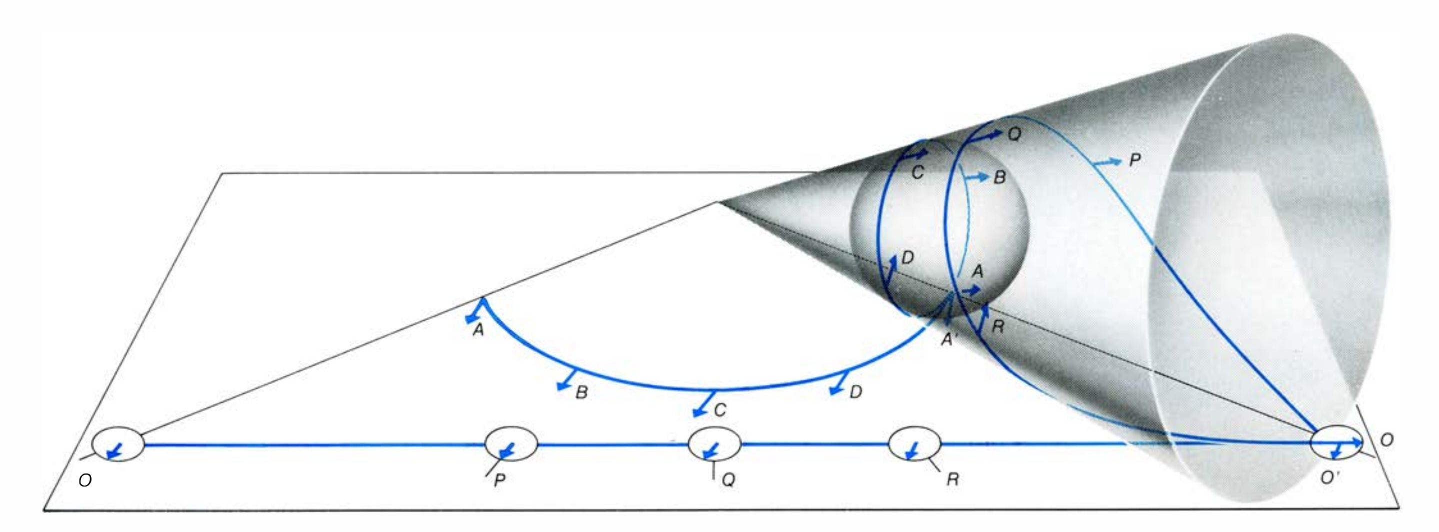
La probabilidad de que un neutrón llegue a un contador dentro del haz recombinado varía con la fase generalizada del haz parcialmente rotado. Para estimar la probabilidad, se cuenta el número de neutrones que llegan por segundo. Si los dos haces parciales están exactamente en fase en ausencia de rotación, el número de cuentas inicial es alto. Esta situación procede de la interferencia constructiva, ya que las dos amplitudes tienen el mismo signo y el cuadrado de su suma es máximo. De hecho, cuando la diferencia entre las fases generalizadas es cero o múltiplo de 360 grados, existe una interferencia constructiva. Después de una rotación completa del vector spin, la diferencia de fase es de 180 grados y las amplitudes tienen signos opuestos. En teoría, la suma debe ser cero; en la práctica, el número de cuentas es un mínimo. Se trata de una interferencia destructiva.

¿Cómo se provoca la rotación de los vectores spin de los neutrones? Colocando un electroimán en la región comprendida entre la segunda y la tercera cara. Uno de los haces parciales atraviesa el campo magnético; el otro, no. El campo hace girar, pues, el spin a lo largo de uno de los haces parciales, mientras que deja intacto al otro. El ángulo de rotación es proporcional a la magnitud del campo magnético. Como resultado, puede decirse que la fase generalizada del primer haz parcial aumenta continuamente, cuando el experimentador incrementa la corriente del electroimán desde cero hasta su valor máximo. A medida que aumenta el corrimiento de la fase, disminuye el número de cuentas de uno de los contadores; la interferencia cambia suavemente de constructiva a destructiva. Después de alcanzar un mínimo de cuentas, las interferencias tienden hacia un máximo cuando la fase generalizada se acerca a un ciclo completo. El ciclo resultante de la variación en el número de cuentas se repite en tanto en cuanto aumente la corriente. Puesto que el ángulo de rotación no depende de la orientación inicial del spin, el experimento no requiere un haz polarizado de neutrones.

El ángulo de rotación total, inducido a lo largo del paso a través del campo magnético, es igual a la frecuencia de precesión de Larmor multiplicada por el tiempo que los neutrones permanecen en el campo. Podemos calcular, por tanto, el ángulo midiendo la velocidad del haz, la intensidad del cam-



PUEDEN GENERARSE VARIOS CICLOS DE INTERFERENCIA, aun cuando el campo magnético sea moderado. El ángulo total de precesión θ del haz girado puede calcularse a partir de la magnitud del campo magnético. Si se representa la intensidad del haz recombinado en función del ángulo θ, la curva experimental se asemejará mucho a la gráfica del coseno de $\theta/2$. Los neutrones de fondo elevan el mínimo por encima de cero. Ocho rotaciones completas del haz producen sólo cuatro picos de intensidad.



EL TRANSPORTE PARALELO lleva una dirección a lo largo de una curva en el plano; así, una flecha señalaría siempre en la misma dirección en cualquier lugar de la curva. Para generalizar la idea a un transporte paralelo a lo largo de una curva en una superficie no plana, imaginemos que las direcciones paralelas en el plano se impriman sobre la superficie cuando ésta ruede sobre el plano, sin deslizar ni girar en relación con la vertical, de suerte que el punto de tangencia permanezca siempre en la curva. Para hacer rodar una esfera a lo largo de sus círculos de latitud conviene trazar un cono tangente a la esfera a lo largo de dicho círculo. Cuando el cono rueda sobre el plano, la esfera lo hará a lo largo del círculo de latitud. Cuando una superficie ruede a lo largo de una línea recta en el plano, la curva impresa sobre la superficie será una geodésica. Si se imprime una geodésica sobre un cono con un ángulo en el vértice pequeño, puede circunscribir el cono y autocortarse bajo un ángulo llamado exceso angular, que mide la curvatura encerrada por el camino.

po y la distancia dentro de este último. En la versión del experimento realizada por Rauch, Bonse y sus colegas, los neutrones recorrieron 1,5 centímetros a través del campo magnético, a una velocidad de 2170 metros por segundo; así, cada neutrón permanece algo menos de siete microsegundos dentro del campo. Cuando el electroimán opera con la máxima corriente, la intensidad del campo es de 400 gauss, que corresponde a una frecuencia de Larmor de 433 millones de grados por segundo. Con estos valores, el vector spin de cada neutrón tarda siete microsegundos en dar unas ocho vueltas completas. Si cada rotación de 360 grados del vector spin devolviera a un neutrón a su estado original, habría que esperar que se observasen ocho ciclos de cuentas máximas y mínimas. La realidad da un resultado bastante distinto. Puesto que el campo magnético aumenta desde cero hasta su máximo, el número de neutrones detectado por el contador pasa solamente por cuatro ciclos.

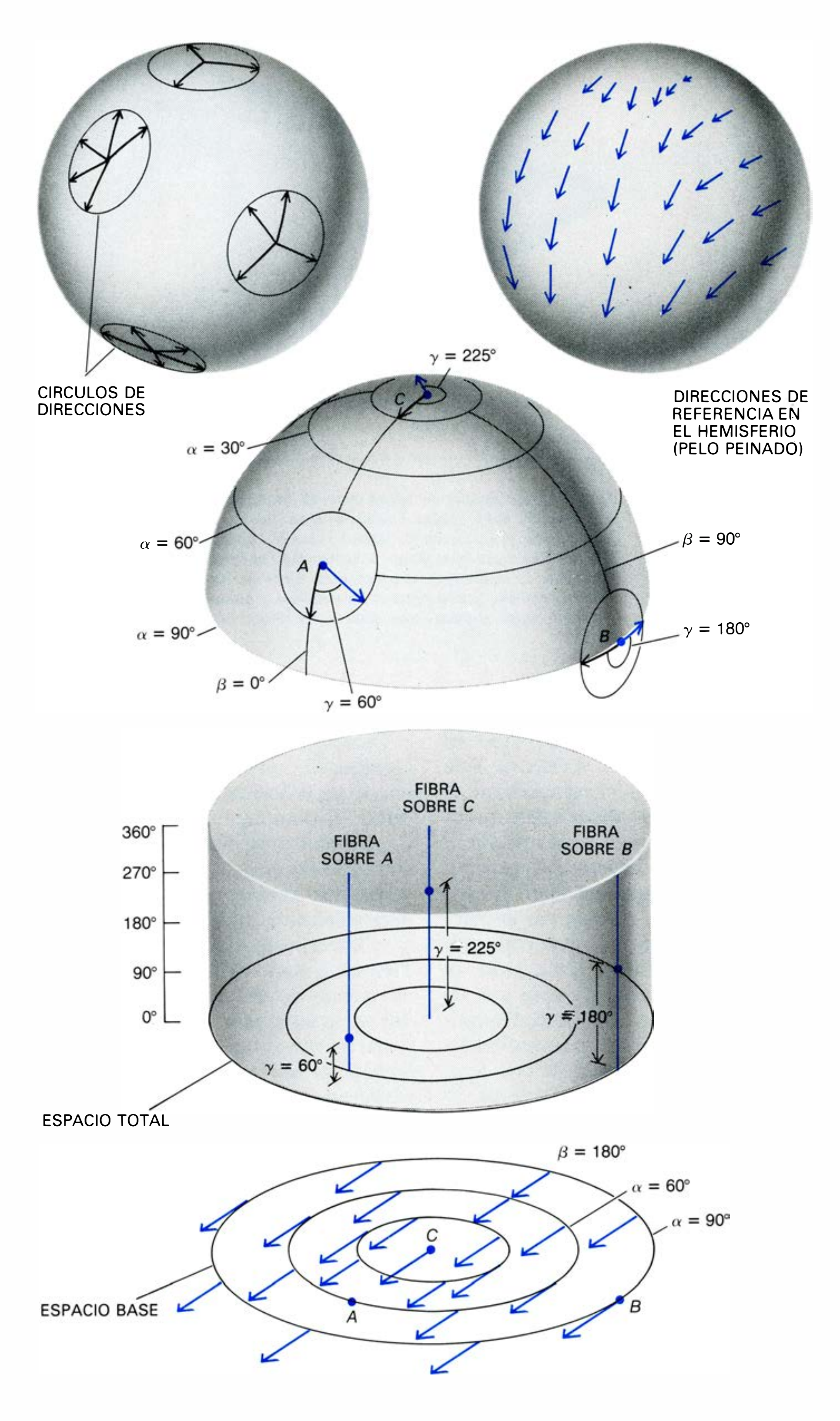
La lección que resulta del experimento de la rotación del neutrón es que existen fibrados en mecánica cuántica y que pueden ser observados. El fibrado asociado a la rotación del neutrón es, sin embargo, de extremada simplicidad, ya que tanto su espacio base como su espacio total son unidimensionales. (Repetimos que el espacio base y el espacio total son círculos, con el espacio total arrollado dos veces como el borde de una banda de Möbius.) La correspondencia entre las rotaciones y el desplazamiento de la fase está comprendida en la regla que dice que el punto en el espacio total debe moverse continuamente, de suerte que se encuentre siempre por encima de la posición del punto en la base. Por existir un solo grado de libertad en el espacio total, la regla establece inequívocamente un corrimiento de fase para cada rotación.

En fibrados de carácter más general, las cosas no son tan sencillas. Si cada fibra es una línea y no un par de puntos, el movimiento en la base comporta movimiento de fibra a fibra, pero sin especificar qué punto de cada una de éstas ha de atravesarse. Para determinar un paso inequívoco a través del espacio total en un fibrado de este tipo, se requiere una estructura adicional. Se llama regla de la elevación del camino al procedimiento que señala el camino, a través del espacio total, que se localiza directamente encima del correspondiente a la base, una vez que se ha establecido el punto de partida en el espacio total.

El estudio de los fibrados surgió al pretender hacer más accesible el análisis de las complejidades de la curvatura de una variedad: un espacio topológico abstracto dotado de un número arbitrario de dimensiones. La idea de un fibrado estaba implícita en la obra del matemático francés Elie Joseph Cartan, pero no fue establecida explícitamente hasta mediados de la década de los 30, por Hassler Whitney, actualmente en el Instituto de Estudios Avanzados. La idea de elevación del camino, desarrollada como un modo sistemático de comparar los efectos de curvatura en diferentes puntos de una variedad, la generalizaron a los fibrados los matemáticos franceses Charles Ehresmann y Henri Cartan y otros en torno a 1950.

Consideremos lo que, seguramente, constituye la variedad curvada más simple: la superficie bidimensional de una esfera. Enfrentado ante dicha superficie, el observador dispone de un círculo completo de direcciones para contemplarla. (Se supone que el observador mira solamente a lo largo del horizonte, y nunca hacia arriba o hacia abajo.) Para cada punto de la superficie existe un círculo de direcciones. Considerados en su conjunto, los círculos constituyen un fibrado de una forma natural, llamado el haz de direcciones en la superficie de la esfera. El espacio base del haz es la propia superficie. La fibra sobre un punto de la base representa el conjunto de todas las direcciones de la superficie de la esfera que pueden verse desde dicho punto. Cada fibra es, pues, un círculo.

No se puede dibujar un cuadro fiable que comprenda el espacio total del haz de direcciones de la esfera. Una razón de que no haya manera de construir ese dibujo se funda en que resulta topológicamente imposible asignar, de un modo continuo, una dirección de referencia a cada punto de la superficie de la esfera. Lo que se expresa gráficamente con el dicho de que "no se puede peinar el pelo de una esfera"; por lo menos un punto de la esfera tendrá siempre un "mechón rebelde". Ello no obsta que se pueda peinar cualquiera "región capilar" de la esfera, aun en el caso de que dicha "región" cubra la superficie entera salvo un solo punto. A



HACES DE DIRECCIONES en la superficie de una esfera; constituyen un ejemplo importante de fibrado. A cada punto de la esfera le corresponde un círculo de direcciones, a lo largo de las cuales se puede contemplar la superficie. Para clasificar estas direcciones con ángulos debe asignarse una dirección de referencia a cada punto. Si las direcciones referenciales pudieran ser asignadas en cualquier lugar de una manera continua podría "peinarse el pelo" de la esfera, pero ello es imposible; habrá siempre un "mechón". Sin embargo, el pelo puede ser peinado sobre cualquier región menor que la superficie entera. Así, en un mapa plano del hemisferio septentrional la descripción "para abajo y a la izquierda" especifica una dirección en cada punto, definiéndose un conjunto continuo de direcciones de referencia en el hemisferio. Podemos representar el haz de direcciones en el hemisferio adoptando el mapa plano como un espacio base. Cualquier dirección en un punto del hemisferio aparece en la línea vertical sobre el correspondiente punto del mapa, y a una altura que corresponde al ángulo que la dirección forma con la de referencia. Las alturas 0 y 360 corresponden a la misma dirección. El espacio total de un haz es un cilindro cuyos puntos en el extremo y en la base de cada fibra vertical son idénticos. Las flechas de las direcciones de referencia del mapa son paralelas, pero sus correspondientes en la esfera no denotan transporte paralelo.

una tal "mancha capilar", podemos asignarle un conjunto continuo de direcciones y dibujar, así, una figura topológicamente exacta del espacio total del haz de direcciones sobre el camino. Por ejemplo, en un mapa plano del hemisferio norte podríamos representar un conjunto continuo de direcciones, todas ellas apuntando hacia abajo y a la izquierda. El conjunto de direcciones podría devolverse al hemisferio norte de la esfera para peinar su pelo.

Peinando el pelo en el hemisferio se obtiene una dirección de referencia en cada punto. El espacio total del haz de direcciones en la semiesfera puede ilustrarse dibujando cada fibra verticalmente. Si la base de cada fibra corresponde a la dirección de referencia, el ángulo que cualquier otra dirección forma con la de referencia puede representarse por su altura a lo largo de la fibra [*véase la ilustración de la izquierda*]. El punto a mitad de camino de la fibra representa 180 grados respecto de la dirección de referencia y el situado en el extremo corresponde a 360 grados. Puesto que esta última coincide con la dirección de referencia, el punto más bajo y el más alto de cada fibra significan el mismo punto en el espacio total.

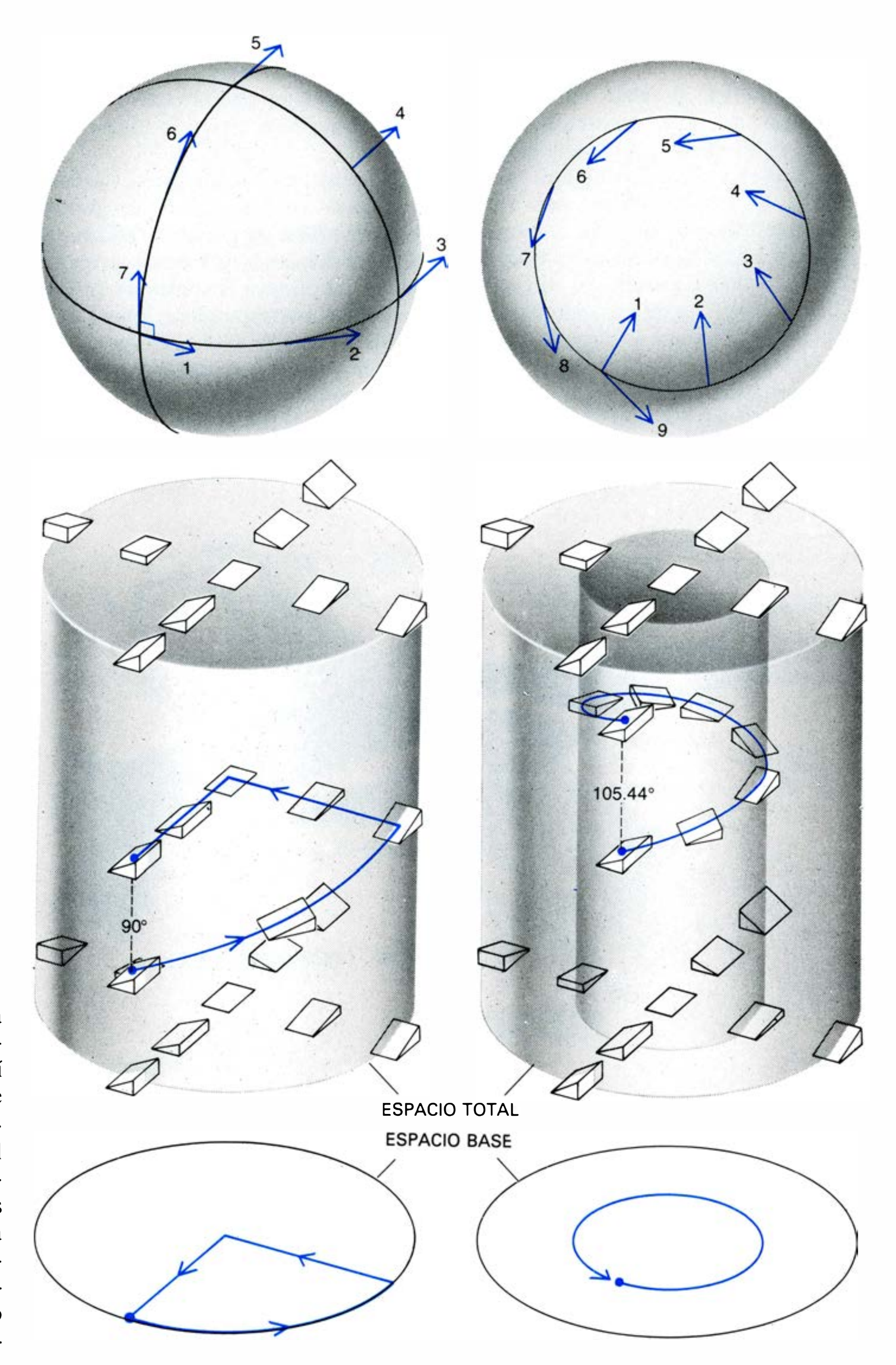
¿Cómo definir una regla de la elevación del camino para el haz de direcciones de la esfera? Un camino en el espacio base del haz de direcciones es simplemente un camino en la superficie de la esfera. Elevar este camino en el espacio total requiere que se asigne la dirección elegida del círculo de direcciones a cada punto del camino. Pensemos en un reloj con una aguja, transportado de tal modo que su centro se mueva a lo largo del camino de la esfera, mientras la aguja se mueve libremente alrededor de la esfera del reloj. La regla de elevación del camino debe determinar la posición de la aguja en cada punto del recorrido, una vez conocida la posición inicial de dicha aguja. Si atendemos sólo a la topología de la esfera, de tal modo que su superficie pueda ser estirada y deformada (pero no rasgada) cual si se tratara de una tira de goma, no hay ninguna forma privilegiada de establecer esta regla. La razón fundamental estriba en que no existen relaciones topológicas entre las direcciones en un punto de la superficie de la esfera y las correspondientes a otro. Sin embargo, si se considera la geometría de la esfera, hay un principio natural que determina el movimiento de la aguja del reloj. El principio se llama transporte paralelo.

El transporte paralelo de una esfera puede entenderse mejor imaginando que dicha esfera rueda sobre una superficie plana. Supongamos que hay líneas rectas y curvas dibujadas, con tinta fresca, en la superficie plana; supongamos también que hay flechas espaciadas con una cierta frecuencia a lo largo de las líneas, apuntando todas ellas, por ejemplo, hacia la parte inferior izquierda. La expresión transporte paralelo se funda en esa imagen. Puesto que las flechas dibujadas en el plano son todas paralelas, las que quedan marcadas en la esfera constituyen el ejemplo de un transporte paralelo a lo largo de una curva impresa en la esfera.

El transporte paralelo determina una regla de elevación de camino en el haz de direcciones de la esfera. Dada una curva en la esfera, y una flecha que represente una dirección en el inicio de la curva, se puede colocar la esfera en el plano, de manera que el punto de partida sea el de tangencia. Imaginemos que hay una flecha en cada punto del plano, dibujada en tinta y paralela a la original. Si hacemos rodar la esfera a lo largo del plano, para que imprima la curva de la esfera sobre el plano, las flechas de éste se imprimirán también sobre la esfera. Esas últimas flechas construyen un camino en el haz de direcciones que parten de la flecha inicial y se encuentra sobre la curva en cuestión.

Al imprimir una línea recta sobre la esfera que gira (o sobre otra superficie curva cualquiera), la curva que así se forma sobre la superficie se llama geodésica. En la esfera, la geodésica constituye un círculo máximo. El camino más corto entre dos puntos sobre la superficie es una geodésica. Las flechas que apuntan todas en la misma dirección en el plano llevan el marchamo de esa propiedad cuando se imprimen sobre la geodésica. En cada punto a lo largo de ésta el ángulo entre la flecha y la tangente a ella es el mismo.

El transporte paralelo puede describirse para el caso de un camino curvo formado por segmentos de geodésicas sin hacer referencia al rodaje. Para llevarlo a cabo, se mantiene un ángulo constante entre las flechas transportadas y las tangentes a lo largo de geodésicas sucesivas. Sin embargo, desde una perspectiva por encima de la superficie de la esfera, el transporte paralelo a lo largo de una geodésica puede recordar cualquier cosa menos un paralelismo: da la impresión de que las flechas giran. Cuando se imprime una línea curva arbitraria sobre la esfera, la rotación de las flechas vista desde encima de la su-

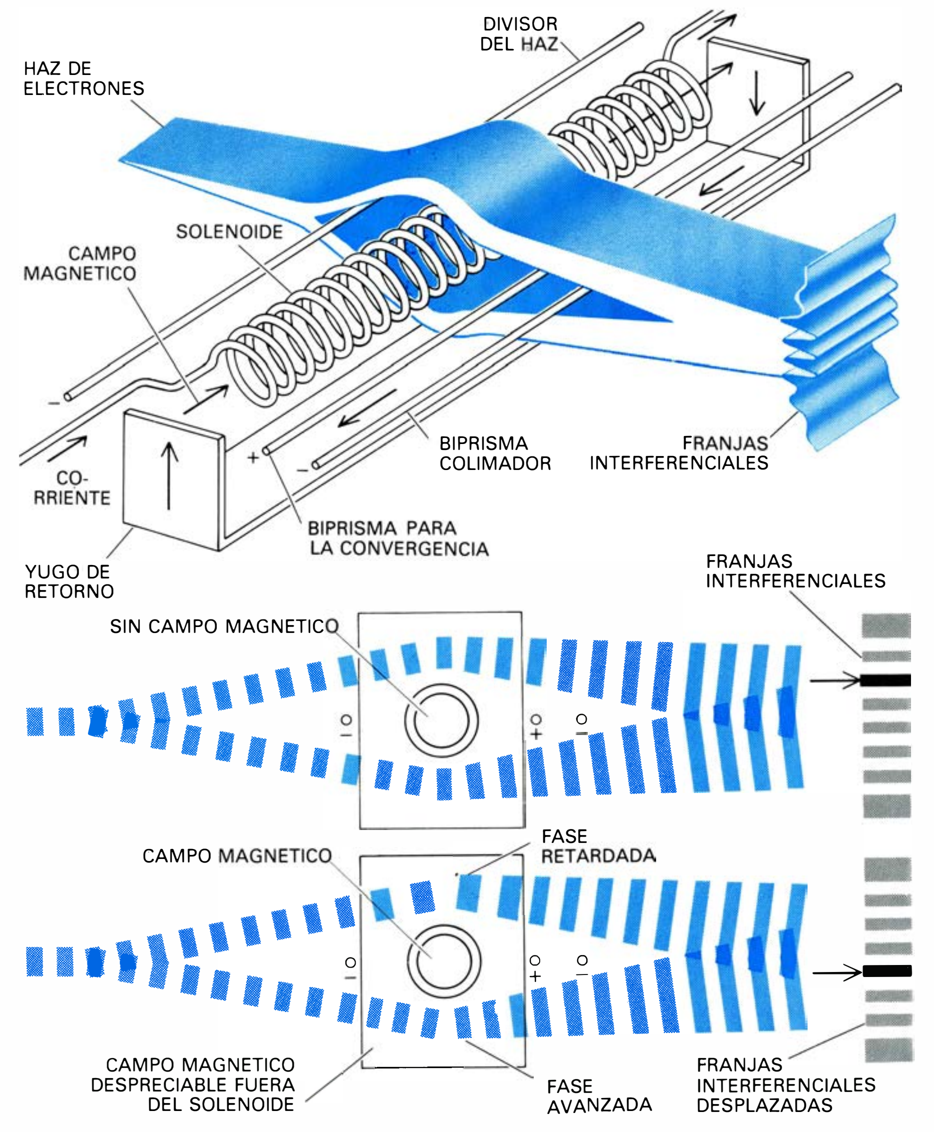


ELEVAR UN CAMINO **en un fibrado es un procedimiento diseñado para hallar un camino en el espacio total, que parte de un punto dado y se encuentra directamente sobre el camino de la base. Para el haz de direcciones en la superficie de la esfera, el transporte paralelo de direcciones en la superficie ofrece una sola elevación por camino. El haz de direcciones sobre el hemisferio septentrional puede representarse como un espacio total cilíndrico. Cada dirección se encuentra a una altura que corresponde al ángulo que forma con la dirección de referencia, elegida aquí como la que apunta hacia la parte inferior izquierda del mapa plano del hemisferio norte. Para el camino alrededor del triángulo esférico geodésico, las direcciones de referencia apuntan hacia el sur, a lo largo del meridiano, al iniciar el camino. El ángulo entre la dirección de transporte (*flechas coloreadas*) y la tangente a una geodésica es constante. En el primer lado del triángulo, la geodésica se curva respecto de la dirección de referencia, de tal modo que el ángulo entre la dirección de transporte y la de referencia aumenta de forma constante. A lo largo del segundo y del tercer lado del triángulo, la dirección de transporte mantiene un ángulo de 180 grados con la dirección de referencia. Cuando la flecha vuelve a su punto de partida, su dirección ha cambiado en 90 grados, el exceso angular del camino triangular cerrado. Los cambios ocurridos en las direcciones de transporte se representan como un camino elevado en el haz de direcciones del hemisferio. Para el camino alrededor de los 45 grados de latitud, la dirección de transporte comienza a 180 grados de la dirección de referencia y aumenta de un modo constante el ángulo que forma con ésta. Una conexión puede definir una regla de elevación de camino sin referencia al transporte paralelo asignando planos a cada uno de los puntos del espacio total. El camino elevado debe ser tangente a estos planos. Las pendientes de los planos son las mismas para todos los puntos a lo largo de una sola fibra, pero varían continuamente de fibra a fibra; los planos nunca deben ser verticales. Esta colección de planos se llama una conexión en el fibrado.**

perficie se nos revela más caótica todavía.

El transporte paralelo nos permite establecer, de modo cuantitativo y explícito, la diferencia intuitiva que existe entre una superficie curva y otra plana. Cuando avanza una flecha por transporte paralelo, a lo largo de un camino cerrado en el plano, coinciden la dirección de la flecha al principio con su dirección al final. Lo que no ocurre con el transporte paralelo a lo largo de un camino cerrado en una superficie curva. Si se produce un cambio en la dirección de la flecha cuando completa un circuito en un camino cerrado, el ángulo entre la dirección final y la inicial se llama exceso angular del camino. Del modo utilizado para definir el transporte paralelo se deduce que el exceso angular no depende de la dirección inicial de la flecha.

Los matemáticos prefieren expresar los ángulos en radianes, no en grados. (La conversión de grados a radianes se hace multiplicando la medida de un ángulo en grados por la constante $2\pi/360$. Un radián corresponderá, pues, a 57 grados.) Cuando el exceso angular se mide en radianes, el número resultante se denomina curvatura total de la región encerrada por el camino. Podemos definir ahora la curvatura media de una región como su curvatura total dividida por su área. Se ha establecido, por convención, que el signo de la curvatura media viene dado correctamente cuando se transporta la flecha a lo largo del camino en el sentido contrario de las agujas de un reloj, de suerte que la región quede en la parte izquierda del camino. La curvatura de una superficie en un punto puede definirse como el valor límite de la curvatura media de regiones, cada vez más pequeñas, que contienen el punto.



CORRIMIENTO DE FASE EN EL ELECTRON. No sólo un campo magnético puede producir un tal corrimiento, sino también el propio paso del electrón a través de una región próxima a un campo magnético. Para detectar el efecto, se divide un haz de electrones por medio de un conductor cargado negativamente, haciendo pasar los dos haces parciales por los lados opuestos de un solenoide, en cuyo interior hay un campo magnético confinado, y recombinando después los haces parciales de modo que interfieran. A medida que se aumenta la corriente del solenoide, crece el campo magnético, desplazándose las bandas de interferencia correspondientes a los haces superpuestos. Como los haces de electrones sólo permanecen coherentes si su separación no supera los 60 micrometros, se requiere un aparato experimental muy pequeño: el diámetro del solenoide no llega a la séptima parte del grosor de un cabello humano. Un experimento de esta clase lo propuso por vez primera, en 1959, Yakir Aharonov, de la Universidad de Yeshiva, y David Bohm, de la de Londres, aunque lo habían postulado en 1949 Ehrenberg y Siday.

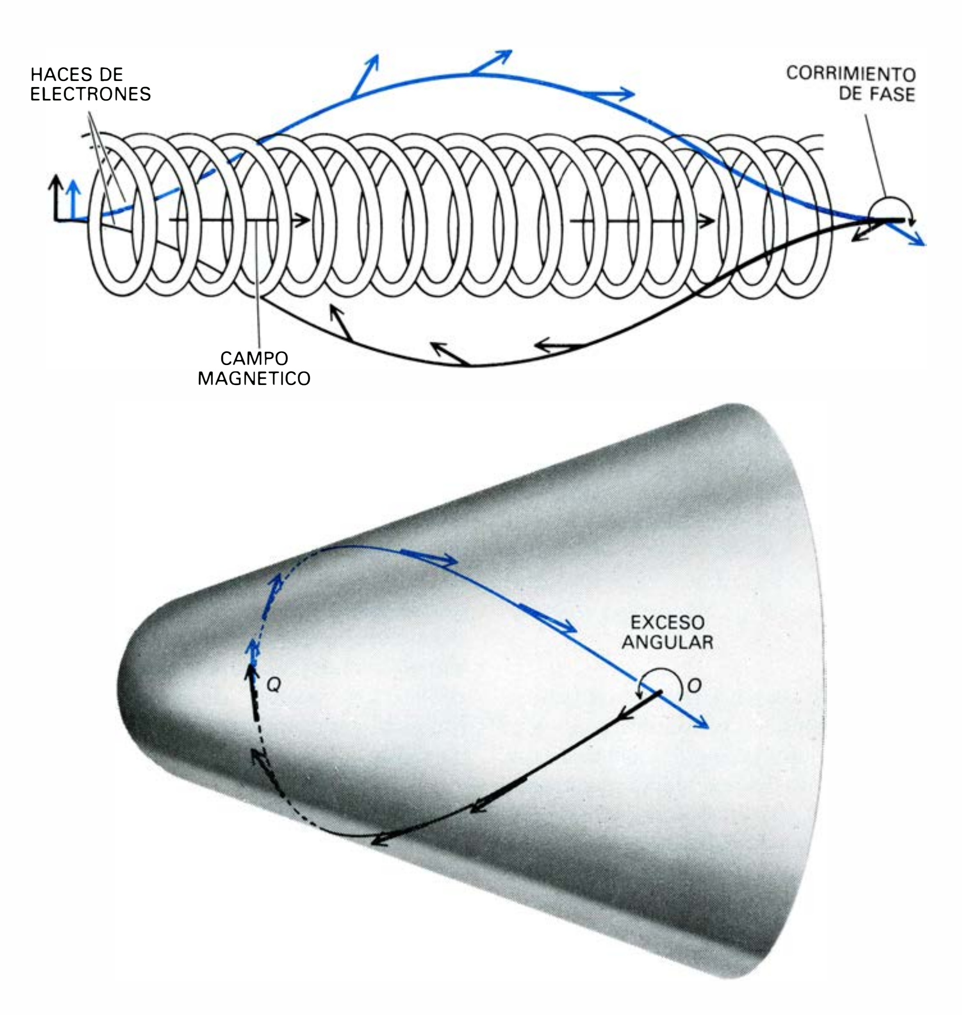
El transporte paralelo permite definir una regla de elevación del camino desde la superficie de la esfera hasta el espacio total en todas las direcciones. En el espacio total, el exceso angular se representa como la distancia angular a lo largo de la fibra que corresponde al punto del camino cerrado donde comienza y termina el circuito de transporte paralelo [*véase la ilustración de la página anterior*]. Así pues, la curvatura total de la región encerrada por un camino en la base se representa por una distancia a lo largo de una de las fibras en el camino elevado. En consecuencia, reemplazando el transporte paralelo por una regla arbitraria de elevación de camino, se generaliza la noción de curvatura a otros fibrados en los que la operación de transporte paralelo no tenga sentido. Estas reglas de elevación del camino deben formularse sin hacer referencia ni a geodésicas ni a ángulos.

En vez de centrarnos en la geometría del espacio base, como se hace en el transporte paralelo, podemos elevar un camino imponiendo una estructura al espacio total. Un modo de hacer esto es asociar, a cada una de las fibras, un conjunto de planos paralelos, deslizantes e inclinados. La inclinación de los planos determina con qué rapidez sube o baja un camino elevado cuando se mueve de una fibra a otra en el espacio total. Los planos no deben ser nunca paralelos a las fibras. Sus inclinaciones han de variar continuamente de un punto a otro y poseer la misma pendiente en todos los puntos correspondientes a una fibra dada. La última condición es análoga a la que garantiza, en el transporte paralelo, que el exceso angular (y con ello la curvatura) sea independiente de la dirección inicial de la flecha que se transporta. Se llama una conexión en el fibrado al conjunto de planos continuos de ese tipo en el espacio total. En el punto de una fibra por donde un camino elevado la corta, el camino debe ser tangente al plano inclinado asociado al punto. Así es como el plano define la inclinación del camino

elevado en el punto. La ilustración de la página 101 muestra la conexión que eleva caminos sobre la esfera, igual que lo hace el transporte paralelo.

Podemos definir la curvatura de una conexión por un procedimiento similar al que se emplea para medir la curvatura de una superficie. El procedimiento intenta asignar a cada punto de la base un número que representa la curvatura en dicho punto. (Para espacios de más dimensiones, la curvatura no se especifica por un solo número, sino por varios, que son las componentes de un ente matemático llamado tensor.) El número que mide la curvatura de la conexión se obtiene a través del análogo del exceso angular para caminos, cada vez menores, que rodeen el punto. Una conexión tiene curvatura cero sobre una región de la base si todas las curvas cerradas, suficientemente pequeñas, de la región se convierten en curvas cerradas al elevarlas al espacio total. Cuando esto sucede, la conexión se llama plana, por analogía con el transporte paralelo en la geometría del plano. Si la conexión tiene curvatura distinta de cero, los pequeños caminos cerrados de la base se convierten, al elevarlos al espacio total, en curvas no cerradas.

El movimiento a lo largo de caminos elevados, en una región donde la conexión es plana, se parece al movimiento en la ladera de una colina. Siguiendo un camino cerrado pueden verificarse una o varias alturas sobre el nivel del mar. Sin embargo, carece de interés cómo se circula a lo largo de la carretera cuando se vuelve a las coordenadas de la superficie (longitud y latitud) del punto de partida y se ha vuelto, por ello, a la misma elevación. Por su parte, el movimiento en una región curva de la conexión recuerda el movimiento en una cueva. Algunas sendas o pasadizos de la cueva pueden desembocar en las mismas coordenadas de longitud y de latitud, pero la altura puede ser muy diferente de la que existía en el punto de partida. En matemática, una conexión sobre una región de la base es plana sólo si los planos de las direcciones que definen la conexión son tangentes a una familia de superficies. Cada superficie corresponde a una ladera de la comparación empleada anteriormente. Las superficies deben ser conformes una con otra, y estar distribuidas de modo análogo a lo que sucedería con cucharas apiladas que llenaran la parte del espacio total que se encuentra por encima de la región de la base. Cada superficie debe tener el mismo número de dimensiones que la base.



CORRIMIENTO DE FASE del haz de electrones en el experimento de Aharonov-Bohm (*ilustración superior*). Puede tomar de modelo el transporte paralelo en una dirección de la superficie de un cono truncado cubierto con una cúpula esférica (*figura inferior*). El corrimiento de fase a lo largo de cada haz se representa por la rotación de una flecha. Los dos haces parciales comienzan estando en fase. La fase será retardada a lo largo del camino coloreado y adelantada a lo largo del negro. El desfase por el campo magnético a lo largo de los dos caminos es cero; los desplazamientos son directamente proporcionales al campo magnético entre los caminos. En el cono con cúpula, la geometría de la región cónica es análoga a la del plano: la región puede dividirse longitudinalmente y desenrollada sobre un plano sin estiramientos ni compresiones. El transporte paralelo a lo largo de dos caminos alrededor del cono no conducirán, sin embargo, a la misma dirección cuando los caminos se encuentren de nuevo, aun cuando la curvatura a lo largo de ambos resulte ser cero. Estos caminos forman una curva, que es una geodésica autocortante; las flechas representan la dirección tangente a la curva. Por tener la dirección de la tangente un transporte paralelo a lo largo de la geodésica, el exceso angular de la curva es idéntico al ángulo bajo el cual se cortan los dos caminos. El exceso angular, medido en radianes, es igual a la curvatura total de la región entre los caminos. La curvatura se concentra en la cúpula, como el campo magnético se confina en el solenoide.

Llegados aquí, podemos esbozar ya de qué manera los fibrados representan las distintas características de un campo gauge (o de contraste). Una denominación más descriptiva del campo gauge sería la de campo de desplazamiento de fase. En las teorías al uso sobre el campo gauge de las fuerzas nucleares, los desplazamientos de fase actúan en las ondas mecánico-cuánticas para cambiar la identidad de la partícula que la onda describe. Por ejemplo, para cambiar la probabilidad de amplitud de un campo de protones en el correspondiente a neutrones, y viceversa, lo que supone alterar continuamente la probabilidad de que la partícula sea un neutrón o un protón, basta con desplazar las fases generalizadas.

La teoría cuántica del magnetismo suministra un ejemplo mucho más sencillo de las propiedades de desplazamiento de fase en un campo gauge. El campo gauge en cuestión se llama potencial del vector magnético; determina cómo interaccionan los electrones con un campo magnético. La vía más clara para demostrar el efecto del potencial del vector magnético, de modo experimental, es aquella que utiliza las figuras de interferencia de ondas de electrones.

Podemos representar un electrón de un haz por ondas cuya longitud sea inversamente proporcional al momento del electrón y cuya frecuencia sea directamente proporcional a su energía. En cada punto del espacio, una onda de es-

tas características posee, en cada instante, una altura definida, de manera parecida a cómo una onda de agua tiene una altura instantánea por encima o por debajo del nivel medio de la superficie. La secuencia de las alturas, en un punto, varía periódicamente de un máximo a un mínimo. Representando gráficamente las alturas se obtiene una curva similar a la del coseno. Por ser éste una función cuyo argumento es un ángulo, la altura instantánea de una onda puede determinarse dando la altura máxima de la onda y el ángulo que corresponde a la altura instantánea de la curva del coseno. La curva alcanza su altura máxima, por ejemplo, a cero grados y su mínimo, o su mayor valor negativo, a 180 grados, y tiene una altura de cero a 90 y a 270 grados, respectivamente.

El ángulo correspondiente a la altura instantánea de una onda de electrón se denomina ángulo fase de la onda. El ángulo fase no afecta a la probabilidad de hallar un electrón en un punto, ya que la amplitud de probabilidad sólo es proporcional a la altura máxima de la onda del electrón. (Y según es acostumbrado, para buscar la probabilidad se eleva al cuadrado la amplitud de probabilidad.) Así pues, si se desplaza la fase de la onda del electrón de un modo arbitrario en cada punto del espacio, la probabilidad de hallar el electrón en cualquier punto no cambia. Se llama transformación gauge a la función que asigna, a cada punto del espacio, ese desplazamiento local de la fase.

Aunque la fase total de un solo haz de electrones no incide en las cantidades observadas, la fase relativa a la que dos haces parciales llegan al mismo punto sí tiene consecuencias físicas. Una diferencia de fase entre dos haces que interfieren puede alterar la altura máxima de la onda del electrón y modificar, así, la amplitud de probabilidad.

La figura de interferencia pone de relieve la variación que existe, de un punto a otro, en la probabilidad de encontrar una partícula. Por tanto, allí donde dos haces parciales se superpongan crearán un estado interferencial. Supongamos que el experimento es simétrico y que los haces están exactamente en fase en el centro de una pantalla detectora. El valor de la fase en el centro de la pantalla puede modificarse a voluntad, pero ese mismo cambio ocurrirá en cada uno de los haces parciales. Por ello, la interferencia es constructiva bajo cualquier transformación gauge en el punto.

Se forma la figura de interferencia porque, en puntos de la pantalla detectora, a la izquierda del centro por ejemplo, las ondas del haz parcial izquierdo han recorrido una distancia más corta que las ondas procedentes del haz parcial derecho hasta llegar a la pantalla. A medida que nos alejamos en nuestra investigación del centro de las franjas interferenciales, la diferencia de fase o fase relativa alcanza un valor mayor, creando una variación periódica en la intensidad que constituye la figura de interferencia. La figura interferencial se detecta como una variación en la tasa de contaje de la región donde se superponen los haces parciales. Si algún efecto físico introdujera una diferencia de fase entre los dos haces parciales que llegan al centro, se produciría esa misma diferencia de fase en cada punto situado a la derecha o a la izquierda del centro. Las "franjas" de la figura interferencial estarían uniformemente desplazadas.

Cuando se trata de partículas cargadas eléctricamente, el potencial vectorial magnético es un campo que actúa desplazando la fase en todos los puntos del espacio. El potencial vector determina el campo magnético; de hecho, los efectos magnéticos ejercidos en partículas cargadas pueden explicarse enteramente en función de los corrimientos de fase producidos por el campo del potencial vector. La razón subyacente de que el campo del potencial vector sea un campo gauge está en que la fuerza magnética actúa en una partícula cargada cambiando su dirección sin alterar su energía. Cuando un electrón entra en un campo magnético, la frecuencia de sus ondas permanece constante, pero cambia el espectro espacial de las ondas. Es como si la longitud de onda variase de un punto a otro. El corrimiento de fase de un electrón causado por un campo magnético depende, por ello, de la trayectoria del electrón.

En la teoría clásica del magnetismo, se concebía el potencial vector magnético como un artificio auxiliar para calcular el campo magnético. Los cálculos mostraron que el potencial vectorial magnético podía ser no nulo en regiones donde no existiera campo magnético. De ahí que los físicos pensaran que el potencial vector magnético no tenía por sí consecuencias observables.

En mecánica cuántica, el campo del potencial vectorial magnético sí tiene consecuencias observables. Su esperado efecto sobre la fase lo anunciaron W. Ehrenberg, de la Universidad de Londres, R. E. Siday, de la Universidad de Edimburgo, en 1949. Sin embargo, hubo que esperar hasta 1959 para que Yakir Aharonov, de la Universidad de Yeshiva, y David Bohm, de la Universidad de Londres, propusieran un experimento en que pudiera observarse directamente tal efecto.

Como sucedía con el experimento de la rotación del neutrón, el de Aharonov-Bohm desdoblaba un haz de partículas subatómicas recombinando los haces parciales y observando la interferencia resultante. En vez de neutrones, se emplearon electrones. Ello planteaba un problema técnico, ya que la distancia máxima para la cual las dos partes de un haz de electrones separado permanecían coherentes era sólo de 60 micrometros. Hasta para acometer una separación tan pequeña había que instalar todo el experimento en el interior de un microscopio electrónico. Quien primero logró el experimento fue R. G. Chambers, de la Universidad de Bristol, en 1960; en 1961, Gottfried Möllenstedt y Werner Bayh, de la Universidad de Tubinga, confirmaron el efecto en un experimento más elaborado.

El haz de electrones incidente viaja hacia un conductor con carga eléctrica negativa que lo divide en dos haces parciales coherentes. Los haces divergentes rodean, por la parte exterior, lados opuestos de un electroimán solenoidal cuyo diámetro exterior mide 14 micrometros (menos que la séptima parte del espesor de un pelo humano). El electroimán se instala de manera que confine el campo magnético en el interior del solenoide. Los electrones, que permanecen fuera de éste, pasan a través de un campo magnético despreciable; cualquier cambio de fase que ocurra habrá que atribuirlo, pues, al campo del potencial vector magnético que rodea al solenoide.

Más allá del solenoide, en el microscopio electrónico, se encuentra un conductor con carga positiva que vuelve a reunir los haces. Otro conductor cargado negativamente deflecta los haces para que puedan interferir bajo un ángulo pequeño y se aumente así la anchura de las franjas interferenciales. La figura resultante tiene bandas oscuras anchas, correspondientes a la difracción producida por el conductor separador del haz, y franjas finas, procedentes de la interferencia.

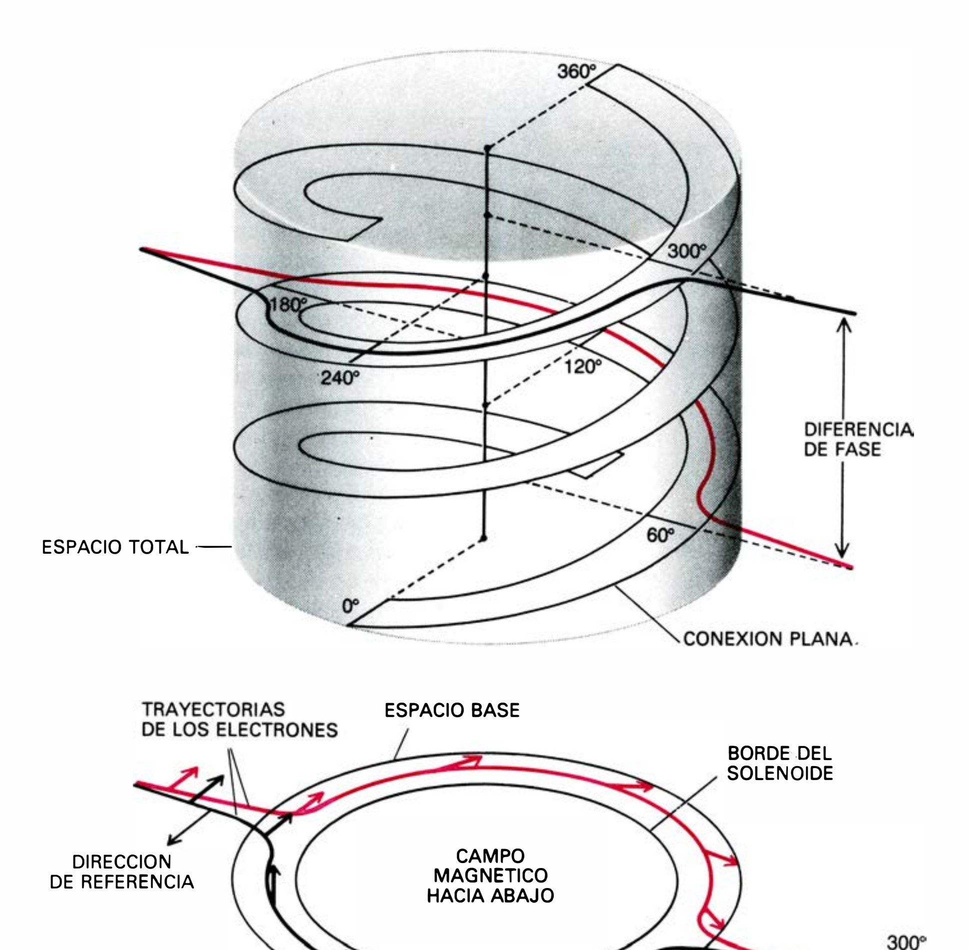
Al aumentar la corriente en el solenoide, el campo magnético se hace más fuerte y las líneas finas del espectro in-

terferencial se desplazan en relación con las bandas anchas de la difracción. El flujo magnético puede calcularse a partir de las dimensiones del arrollamiento y de la corriente que lo atraviesa. Así pues, el experimento aporta una comprobación numérica exacta de la relación entre el flujo magnético y el corrimiento de fase; los resultados confirman las predicciones de la teoría cuántica.

El modelo de fibrado de este experimento esclarece la correspondencia general entre los campos gauge y las conexiones en fibrados. El modelo describe un transporte paralelo en la superficie formada al cortar un cono y cubrirlo con una cúpula. Topológicamente, la superficie así construida equivale a la superficie de un hemisferio, aunque posee una geometría muy diferente. Nótese que si la región cónica se corta longitudinalmente, el cono puede ser desenrollado sobre un plano, sin estirarlo ni comprimirlo. Las longitudes y los ángulos medidos en el cono desenrollado ostentarán los mismos valores que los que se hubiesen obtenido de la medición en el mismo cono. Un observador bidimensional que midiera curvaturas en la superficie del cono, realizando transportes paralelos sobre pequeñas curvas cerradas, encontrará siempre que el exceso angular es nulo. La superficie aparecerá plana. Esta parte de la superficie es análoga a la región que se halla fuera del solenoide en el experimento de Aharonov-Bohm cuando el campo magnético es despreciable.

Si en el cono se consideran caminos suficientemente largos, aparecerán, sin embargo, diferencias apreciables entre el cono y el plano. Una línea recta, en el cono desenrollado sobre un plano, que pase por puntos situados a un lado y a otro de la línea de corte y a la misma distancia del vértice, se convertirá en una geodésica del cono una vez que se haya deshecho el desenrollamiento. Imaginemos un par de observadores bidimensionales que se encuentren ambos mirando, hacia adelante, el punto del bucle directamente opuesto al que resulta de la intersección de la línea de corte con dicho bucle. Si los observadores se mueven a lo largo del bucle, uno avanzando hacia adelante y el otro hacia atrás, deben pensar que se están alejando entre sí a lo largo de una línea recta. Cuando se encuentren de nuevo, en el punto donde el bucle cruza la línea de corte, no estarán mirando, sin embargo, en la misma dirección. El ángulo θ entre ellos es igual a 360 grados menos el ángulo en el vértice del cono desenrollado. Los observadores creerán que la superficie donde se hallan no es plana, debido a que este ángulo es el exceso angular de la superficie cerrada formada por sus caminos. La región a su izquierda tendrá una curvatura total igual a la medida en radianes para el exceso angular.

Lo que sucede a la pareja de observadores bidimensionales, cuando pasan alrededor de lados opuestos del cono, es similar a lo que acontece al par de haces parciales en su paso alrededor de lados opuestos del solenoide en el experimento de Aharonov-Bohm. Ambos observadores miran inicialmente en la misma dirección. De manera análoga, los dos haces parciales de electrones están en fase inmediatamente después de dividirse el haz. Si los observadores miden la curvatura de la superficie a lo largo de uno cualquiera de sus caminos, hallarán que es cero, porque se desplazan en la parte plana del cono. De forma similar, el potencial vector magnético, causa de la diferencia de fase de los haces cuando se recombinan, no puede detectarse por mediciones hechas a lo largo de uno solo de los haces separados.



FIBRADO de los ángulos de fase sobre una sección transversal del experimento de Aharonov-Bohm. Viene casi a coincidir con el de las direcciones de la superficie de un cono con cúpula esférica. Sobre cada punto de la base, la fibra del espacio total representa los posibles ángulos de fase (de 0 a 360 grados) del electrón en dicho punto. Para una elección apropiada de la intensidad del campo magnético, la conexión definida en el haz de fases por el campo del potencial vectorial magnético es idéntica a la conexión dada por un transporte paralelo en un cono con cúpula. La curvatura de la conexión corresponde al campo magnético en el solenoide. La región del interior de éste corresponde a la cúpula esférica. Allí, la regla para elevar el camino es la misma que la regla del transporte paralelo en la superficie de la esfera, y puede ser descrita por el mismo sistema de planos inclinados. La región fuera del solenoide corresponde al cono truncado y, por eso, la conexión es plana. Los planos inclinados son tangentes a una familia de rampas en espiral que llenan el espacio total. Las flechas que giran indican el corrimiento de fase en la base.

La clave de la similitud de los dos efectos está en interpretar el potencial vectorial magnético como conexión en un fibrado. El haz se llama haz de fases. Su espacio base es el tridimen-

sional en que se presenta el experimento. La fibra sobre cualquier punto es el conjunto de todas las fases posibles de electrones en dicho punto, y así el espacio total consta de todas las posibles fases de electrones en todos los puntos del espacio tridimensional. Puesto que una fase puede describirse por un ángulo, medido en grados o en radianes, la fibra sobre cada punto será un círculo, lo mismo que sucede en el haz de direcciones de una superficie. Con una fibra circular para cada punto de un espacio tridimensional, el espacio total tiene, sin embargo, cuatro dimensiones.

El espacio base tridimensional y el total tetradimensional no ayudan precisamente a que nos imaginemos el fibrado de fases. Pero se puede representar un haz de fases sobre un plano que pase a través del experimento perpendicularmente al solenoide. Este fibrado, dotado de un espacio total tridimensional, resulta cabalmente idóneo para describir el resultado del experimento de Aharonov-Bohm.

El fibrado es ahora cilíndrico sobre una superficie; puede dibujarse por fibras verticales, de modo análogo al haz de direcciones de una semiesfera o de un cono con cúpula. En el fibrado las conexiones constituyen un campo de planos transversales a las fibras. La pendiente de uno de los planos en una dirección dada (rampa para arriba o para abajo) es proporcional a la componente del campo del potencial vectorial magnético en la dirección correspondiente al punto de la base. La curvatura de la conexión será, pues, proporcional a la intensidad del campo magnético. Por tanto, la curvatura diferirá de cero solamente en los puntos que se encuentren dentro del solenoide. Para una elección apropiada de la intensidad del campo en el interior del solenoide, la figura de la conexión del potencial vectorial magnético sobre un plano perpendicular al arrollamiento es idéntica a la conexión del transporte paralelo sobre el cono con cúpula [*véase la ilustración de la página anterior*]. La región de la base dentro del solenoide corresponde a la cabeza esférica del cono. Ahí la conexión será idéntica a la que se genera por el transporte paralelo en una esfera. En la región de la base fuera del solenoide, la curvatura de la conexión es cero por ser nulo allí el campo magnético. Los planos de conexión son tangentes a una familia densa de rampas que se encuentran en una espiral alrededor del centro. La diferencia de fase, entre los dos haces de electrones parciales, es exactamente la altura ganada al seguir una de las rampas en una rotación total.

Si la curvatura se calcula para el fibrado entero de fases, se descubre que se trata de un tensor, por ser tridimensional la base. El tensor tiene tres componentes, cada una de ellas proporcional a las correspondientes al campo magnético. La construcción puede extenderse al fibrado de fases sobre espacio-tiempo, donde la base tiene cuatro dimensiones. El potencial eléctrico y el magnético, tomados conjuntamente, dan una conexión que puede explicar todas las interacciones electromagnéticas de las partículas cargadas. La curvatura de la conexión es un tensor con seis componentes, correspondientes a las tres del campo eléctrico y a las tres del magnético.

Cada uno de los campos gauge cuánticos puede entenderse como una conexión en un fibrado donde la base sea espacio-temporal. La fibra de los haces es el conjunto de las transformaciones simétricas internas de partículas que interaccionan por medio del campo gauge. Se han construido fibrados para la electrodinámica cuántica, para las interacciones nucleares débiles y fuertes y para versiones de teorías que intentan presentar la contribución unificada de estas fuerzas. A pesar de no haberse logrado, todavía, un esquema completo de unificación de todas las fuerzas fundamentales, queda claro que la matemática de las conexiones en fibrados está destinada a desempeñar un papel importante en la física teórica.

Creemos que la utilidad y significado físico de dichos conceptos matemáticos no es algo accidental. Ni los matemáticos ni los físicos se encuentran aislados de sus medios culturales, políticos y físicos; las ideas y puntos de vista de los que trabajan en un terreno reciben el influjo de los que lo hacen en el otro. Además, matemáticos y físicos comparten, aun sin confesarlo, análogos puntos de vista sobre el mundo diario y sobre la lógica mediante la cual el mundo se proyecta en la ciencia abstracta. Se hallan comprometidos por vocación en ese trabajo racional. Lo que resulta más maravilloso no es tanto la llamada "eficacia no razonable" de los conceptos matemáticos en física, o la fecundidad de la intuición física como fuente de nuevas matemáticas, cuanto el éxito de la común aproximación intelectual entre matemáticos y físicos en la creación de una imagen rica, coherente y potente del universo físico.

Temas metamágicos

Falacias del principio de incertidumbre y paradojas de la mecánica cuántica

Douglas R. Hofstadter

Cuántas veces se nos habrá escurrido una moneda u otro objeto pequeño por la hendidura del respaldo de una butaca? Queriendo recobrarla, introducimos con tiento los dedos por la rendija, tratando de localizarla. Pero el mismo acto de meter la mano ensancha la grieta, y la moneda se nos cuela más adentro. Nos apercibimos de que, al seguir empujando, corremos el riesgo de perderla para siempre en las entrañas de la butaca. ¿Qué hacer? Ese vulgar drama cotidiano es ejemplo de un sentimiento que todos conocemos, a saber, cómo al esforzarnos por lograr alguna cosa lo que conseguimos es dificultarla.

Una buena amiga ha venido a visitarnos desde muy lejos. Nada nos gustaría tanto como captar en una fotografía su risa encantadora. Pero ella es terriblemente tímida; en el instante de verse ante la cámara se envara, pierde su naturalidad y, nosotros, la oportunidad de conservar un recuerdo de su risa. El acto mismo de querer capturar el fenómeno lo destruye por completo.

No es raro que casos como éste se atribuyan al principio de incertidumbre. Este notable principio de mecánica cuántica fue enunciado en 1927 por Werner Heisenberg. En la mente popular, sin embargo, el verdadero sentido del principio ha quedado oscurecido y erosionado a causa de paráfrasis imprecisas y descuidadas. Me gustaría echar un vistazo al principio en su puridad y aclarar un poco la cuestión, comparándolo con algunos de los impostores.

Enunciaré primero explícitamente una versión espúrea del principio, para que los lectores sepan claramente lo que me propongo atacar.

El pseudo-principio de incertidumbre declara que el observador interfiere siempre con el fenómeno bajo observación. En ciertos campos hay tendencia a mencionar este principio hasta el abuso, sobre todo cuando los fenómenos comportan la posibilidad de observación recíproca, esto es, cuando lo observado puede a su vez observarnos a nosotros. Pero incluso en casos así, el pseudoprincipio es demasiado simplista, pues se inspira en una falsa idea de cómo procede la ciencia al experimentar o explicar. Lo esencial es tener presente que la ciencia trata de clases de acontecimientos, y no de casos particulares. Para explicar algo, la ciencia se sirve de nociones abstractas, subyacentes, al menos en potencia, a un número ilimitado de fenómenos concretos.

Veamos un ejemplo. Hace poco me contaron de una señora que, refiriéndose a una de sus amigas, dijo: "Por aquel entonces, ella salía siempre con comecacas". Quería en realidad decir que "salía con comecocos", con psicólogos y psiquiatras. Por alguna razón se produjo la metátesis de las letras "a" y "o" de una y otra palabras; sin duda sería interesante —y tal vez gracioso— saber con precisión qué sucedió en el cerebro de la mujer al tiempo de tan escatológico metaplasmo. Nos gustaría saber exactamente la causa del descarrilamiento. ¿Qué sucedió, cómo, dónde y por qué?

Ahora bien, este fenómeno es único; seguramente nunca vuelva a repetirse. Por ello, es muy improbable que alguna vez se expliquen científicamente los detalles del acontecimiento. Lo que debemos hacer, en cambio, es abstraer cierto fenómeno general que nos parezca componente esencial de este caso concreto. Tenemos que poder imaginar otros sucesos del mismo tipo general. Tenemos que ser capaces de idear algún procedimiento para provocarlos, o detectarlos cuando sucedan, a fin de estudiar las pautas que puedan presentar. Tal vez el nivel de abstracción idóneo sea "dislalia de la mujer M". De acuerdo con el proceso de abstracción que se realice, habrá que diseñar los experimentos necesarios.

La risa de nuestra tímida amiga es, presumiblemente, un fenómeno repetible; haberlo echado a perder en una ocasión no significa haberlo perdido para siempre. Con un poco de paciencia y algo más de ingenio podríamos captar la expresión que buscamos, tal vez con ayuda de un teleobjetivo y un obturador de control remoto, tomándole así la fotografía sin que ella se percatara.

En el caso de la moneda perdida entre el tapizado de la butaca, podríamos fabricar sin mucho esfuerzo un instrumento especial para recogerla. La verdad es que en *cualquiera* de estos casos de la vida cotidiana —incluso en fenómenos donde hay observación recíproca— invirtiendo suficiente esfuerzo e ingenio *sí* podemos aislar una cierta versión del fenómeno, y hacerlo de esta forma insensible a nuestra observación. Nunca obtendremos una reproducción perfecta de un acontecimiento específico, pero en tanto estemos interesados en fenómenos generales y no en sucesos irrepetibles, podemos siempre reducir la influencia del observador (nosotros mismos) a valores tan cercanos a cero como sea necesario. Quizá se requiera para ello un presupuesto de un trillón de pesetas, pero aquí estamos analizando los principios, y no la pragmática, del problema.

Es necesario insistir en esto, porque mucha gente tiene la creencia de que el principio de indeterminación es realmente válido para los fenómenos ordinarios. Nada más lejos de la realidad. ¿A qué se refiere, por tanto, el principio de incertidumbre postulado por Heisenberg?

Para explicarlo tendremos que remontarnos a uno de los tres fundamentales artículos que Albert Einstein publicó en 1905, concretamente, al llamado artículo fotoeléctrico, donde postulaba que la luz estaba compuesta por entidades discretas, individuales, llamadas fotones. Con este artículo se abrió por vez primera una ventana que daba al misterioso mundo de la mecánica cuántica. Dos siglos de cuidadosos experimentos y observaciones habían demostrado inequívocamente que la luz visible se comportaba igual que un movimiento ondulatorio cuya longitud de onda fuese extremadamente pequeña (del orden de 10^{-4} centímetros). Se había observado cómo las ondas lumínicas interferían consigo mismas, anulándose y reforzándose entre sí. Tal comportamiento es homólogo del observable en fenómenos sobre la superficie de lagos y otras masas de agua, como, por ejemplo, la momentánea anulación de la

estela de una motora al interferir con su reflejo en la pared del muelle, o los trémulos reflejos que se forman en las aguas de un lago tranquilo al entrecruzarse los distintos anillos de ondas producidos por los sucesivos rebotes de una piedra plana convenientemente lanzada.

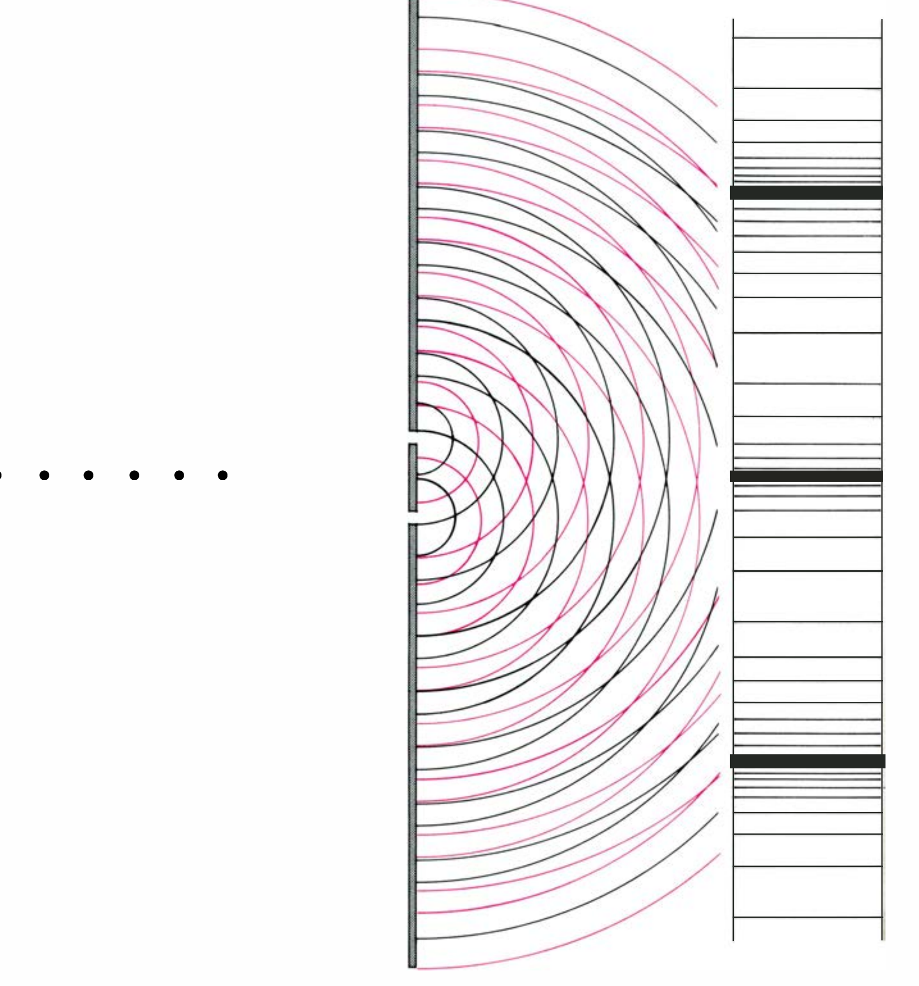
En ciertos aspectos, las ondas luminosas son más sencillas que las ondas acuáticas. En efecto, mientras que las ondas superficiales de distintas longitudes de onda viajan a distinta velocidad, todas las ondas luminosas se propagan en el vacío a una misma velocidad, llamada *c*, aproximadamente igual a 3×10^{10} centímetros por segundo. En el agua, las ondas de gran longitud se propagan más velozmente que las ondas cortas. Por este motivo, al expandirse una perturbación local la vemos disgregarse en anillos concéntricos, producidos por sus diversas componentes. El frente exterior, que se propaga más rápidamente, corresponde a las longitudes de onda máximas; el borde interior de los anillos está formado por las ondas de mínima longitud. Por este motivo, al propagarse, el frente de ondas se va alisando, o, como se dice también, se dispersa. El agua es un medio dispersivo. El medio donde se propagan mejor las ondas luminosas, en cambio, no es dispersivo. ¿Qué medio es ése? Resulta sumamente llamativo que, para propagarse, la luz no requiera medio ninguno, o si se prefiere, el medio idóneo para la propagación de la luz es el vacío. El vacío es no-dispersivo. ¡Aunque bien chocante resulta hablar de ondas capaces de continuar ondulando incluso cuando no hay nada que ondular!

Semejante paradoja tuvo persistentemente intrigado a Einstein, hasta que, en 1905, su fértil imaginación dio con dos elementos fundamentales para resolverla. Uno de ellos fue la teoría de la relatividad; el otro, la noción —nada intuitiva— de que las ondas lumínicas están constituidas por "cuantos" semejantes a partículas. ¿De dónde pudo provenir, sin embargo, la chispa que encendió tan curiosa intuición?

En la teoría clásica, que considera la luz como una onda electromagnética, quedaba el enigma de cómo emitía un "cuerpo negro" luz de diversos colores, es decir, diferentes longitudes de onda. El término "cuerpo negro" induce a confusión; se emplea para describir un cuerpo que absorbe la luz de todas las frecuencias, y no refleja luz de ninguna. Conforme se va elevando su temperatura, el cuerpo negro empieza a emitir luz y calor. Primero lo vemos de color rojo cereza, luego rojo vivo, luego anaranjado, y, al final, azulado y deslumbrantemente blanco. Basta recordar la resistencia de un infiernillo eléctrico para comprenderlo. El problema no resuelto consistía en determinar cuánta luz de cada longitud de onda es emitida por un cuerpo negro a cada temperatura. En la analogía acuática, el problema consistiría, *grosso modo*, en predecir la amplitud (diferencia entre cresta y seno) de las partes frontal, central y posterior de la cresta creada por la caída de una piedra en el lago, en función, pongamos por caso, del momento de la piedra al alcanzar la superficie del agua.

El espectro real de emisión del cuerpo negro había sido cuidadosamente medido a muchas temperaturas por los físicos experimentales; la característica forma de la curva de intensidades-longitudes de onda era bien conocida. Para las longitudes de onda muy largas o muy cortas, la intensidad tendía rápidamente a cero; para una cierta longitud de onda, dependiente de la temperatura, la intensidad emitida era máxima. Estos resultados chocaban frontalmente con las predicciones de la física clásica acerca de las intensidades con que habrían de emitirse los diversos colores. En efecto, la teoría clásica predecía que, conforme disminuyera la longitud de onda, la intensidad de emisión debería tender a infinito, y ello, a todas las temperaturas. Con terminología moderna diríamos que todos los objetos, incluso un cubo de hielo, irradian continuamente los letales rayos gamma, y que lo hacen con intensidades arbitrariamente grandes. Evidentemente, esto es ridículo. Empero, antes de 1900 nadie tenía idea clara de cómo remendar la teoría clásica.

Ese mismo año, Max Planck descubrió una fórmula híbrida, una especie de injerto matemático con dos componentes bien diferenciadas, una correspondiente a longitudes de onda grandes, y otra, a longitudes pequeñas. En las longitudes grandes, esta fórmula estaba acorde tanto con los datos medidos como con las predicciones de la teoría clásica. Para las longitudes de onda más pequeñas, la fórmula de Planck se apartaba de las predicciones de la teoría clásica, pero seguía ajustada a los datos experimentales. En pocas



Un electrón puede atravesar dos rendijas y crear una figura de interferencia **(derecha)**

palabras, la fórmula de Planck valía lo que costaba, a todas las temperaturas y todas las longitudes de onda, pero no había sido deducida de principios ortodoxos. Más bien podía considerarse como una conjetura afortunada, aunque en ella había mucho más que pura suerte, pues la intuición de Planck le había conducido a ella como el rastro guía al sabueso.

El propio Planck estaba especialmente desconcertado por haber tenido que introducir en la fórmula una extraña cantidad que él llamó "cuanto de acción elemental, $\hbar$". El significado de $\hbar$ no saltaba a la vista; se trataba sencillamente de una constante, que, con un valor idóneo, lograría que la fórmula reprodujese exactamente el espectro observado. Tal constante parecía ser, por tanto, una constante universal de la naturaleza.

Mas, ¿qué papel desempeñaba exactamente la constante en la ecuación? ¿Qué significado físico tenía? Fue Einstein el primero en postular la causa de que la constante de Planck, $\hbar$, hubiese de figurar en la ecuación. Einstein partió de la idea de que el contenido energético de las ondas lumínicas estaba concentrado en pequeños gránulos —los fotones— cuyo tamaño guardaba relación con $\hbar$ y con su longitud de onda. Por ejemplo, si la luz es roja, los fotones portan energías del orden de 3×10^{-12} erg. Cada fotón "verde" contiene alrededor de 4×10^{-12} erg. Los fotones de las ondas de radio de onda media tienen energías comprendidas entre 3×10^{-21} y 9×10^{-21} erg, según la emisora que sintonicemos. También se postuló entonces que la cantidad de energía condensada en cada fotón era invariante para cada color (cada longitud de onda).

En la analogía lacustre podríamos imaginar que las ondas creadas en el agua, al alcanzar la orilla, mueren allí, siendo reemplazadas por ranas que saltarían del agua al ribazo, allí donde vinieran a estrellarse las ondas. Cuanto mayor fuese la longitud de onda de los anillos que rizan la superficie, tanto menor sería la rana y la fuerza de su salto. Recíprocamente, cuando los rizos fueran muy finos y apretados, de muy pequeña longitud de onda, al batir contra la orilla se transformarían en ranas monstruosamente grandes, cuyo croar asustaría al mismo trueno, y que, al saltar, derribarían los árboles ribereños y proyectarían cascotes en el agua (en analogía con el efecto fotoeléctrico: el impacto de fotones de energía suficiente consigue arrancar electrones de la superficie de los metales). La interpretación que Einstein dio a la fórmula de Planck implicaba que la energía de las ranas —o mejor, de los fotones— habría de ser inversamente proporcional a su longitud de onda. La ecuación que relaciona estos términos es $E=\hbar c/\lambda$, siendo E la energía del fotón, $\hbar$ la recién descubierta constante de Planck, c la velocidad de la luz, y λ la longitud de onda del fotón. Tan sólo E y λ son variables en esta ecuación. Esta confusión de papeles, esta dualidad de comportamiento onda-partícula fue uno de los más desconcertantes aspectos de la mecánica cuántica, y continúa martirizando desde entonces la intuición de los físicos, si bien desde el punto de vista matemático el florecimiento de la teoría en los años 1920 y 1930 condujo a una considerable clarificación.

El siguiente paso de la ruta que lleva al principio de incertidumbre se dio en 1924, cuando el príncipe Louis Victor de Broglie dedicaba sus reflexiones a la naturaleza —misteriosa naturaleza— corpuscular de las ondas de luz. Se preguntó entonces por qué sólo las ondas lumínicas habrían de asemejarse a partículas. ¿Por qué habría este fenómeno de manifestarse sólo en un sentido? ¿Por qué no a la inversa? ¿No podría suceder también que todas las partículas materiales tuvieran asociadas propiedades ondulatorias? Poco más o menos, la intuición de De Broglie debió de ser así: si queremos generalizar la ecuación de Einstein, y lograr que no sólo sea válida para fotones, sino para otras partículas, tendremos que librarnos de la única alusión directa que en ella se hace a la luz, a saber, su velocidad, c. Después de todo, la enorme mayoría de partículas materiales se mueven a velocidades muy inferiores. Así pues, De Broglie pensó en refundir la ecuación de forma que no dependiera directamente de c.

No resultó tarea demasiado difícil, porque para entonces se sabía ya que los fotones no sólo tenían energía, E, sino también cantidad de movimiento (o momento), p, estando ambas magnitudes relacionadas por la fórmula $E=pc$. Sustituyendo este valor en la otra ecuación podemos simplificar las c, resultando así $p=\hbar/\lambda$. Esta ecuación sigue siendo idéntica a la de Einstein; no contiene elementos físicos nuevos. La osadía intelectual de De Broglie consistió en declarar que tal ecuación tiene que ser universalmente válida —y ello, sin prueba experimental ninguna en su respaldo—. La fórmula debería ser aplicable no sólo a fotones, sino también a electrones, protones, átomos, bolas de billar, personas... ¡incluso perros! Por tanto, nuestro buen Fido tendría asociada una onda, cuya longitud dependería de lo rápido que corriera.

¿Qué significado físico puede tener todo esto? ¿Qué sentido atribuir a la frase "longitud de onda de un perro a la carrera"? Al calcularla, se descubre que la onda asociada a Fido tiene longitud muy inferior al radio de un protón, y, por su parte, Fido se ve considerablemente mayor que un protón. Si Fido fuese muy, muy pequeño, tanto que su tamaño y su longitud de onda fuesen comparables, sus propiedades ondulatorias lo harían difractarse al rebasar objetos filosos, como les ocurre a las olas de la superficie del lago. Pero al ser Fido macroscópico, carece de importancia que tenga una longitud de onda de tamaño subatómico.

Para electrones, la cuestión es totalmente distinta, pues su tamaño es *inferior* al de la longitud de onda asociada. (En efecto, por lo que hasta ahora sabemos, los electrones se comportan como partículas puntuales perfectas, de radio cero.) Poco después de presentar De Broglie su sugerencia, su hipótesis quedó perfectamente demostrada, tanto desde el enfoque teórico como desde el experimental. Pronto se consiguió en muchos laboratorios de todo el mundo poner de manifiesto la difracción de ondas de electrones, como antes se hizo con las ondas luminosas.

Se suscita así una enigmática cuestión. ¿Se encuentran los electrones difundidos por todo el espacio, como lo estarían las ondas, o se encontrarán localizados en puntos? Si verdaderamente son de dimensiones puntuales, ¿cómo es posible que experimenten difracción? Y, si son auténticas ondas, ¿de qué forman transportan su carga eléctrica?

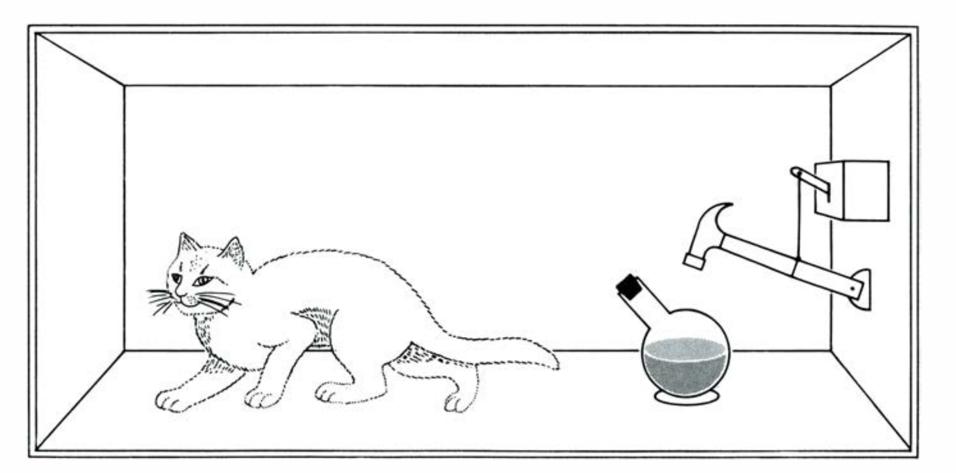
Se ha podido demostrar mediante experimentos que incluso los electrones *individuales* pueden sufrir difracción. En su libro *The Character of Physical Law* (The MIT Press, 1967), Richard P. Feynman da una preciosa descripción del fenómeno. En un experimento ideal, el electrón se dispara hacia una barrera, donde se han practicado dos finas rendijas. Del otro lado de la barrera, y a distancia comparativamente grande de ella, hay una pantalla detectora. El electrón sigue cierta trayectoria y choca contra la pantalla. Semejante acontecimiento, ejecutado una sola vez, produce en la pantalla un punto. Imaginemos el experimento repetido muchas veces, disparando cada vez un solo electrón. Obtendremos sobre la pantalla una formación de puntos. La intuición nos dice claramente que debemos esperar que los impactos se agrupen directamente detrás de las rendijas, enrarecién-

dose rápidamente al separarnos de la zona de impactos. Con otras palabras, esperaríamos encontrar dos cúmulos de puntos, y no distribuciones de ninguna otra especie.

Pero cuando la longitud de onda asignada por De Broglie a los electrones del experimento sea del mismo orden que la separación entre rendijas, tras varios miles de impactos en la pantalla, la configuración producida será muy diferente de la explicada: será una estructura regular, compleja, típica de las interferencias de ondas emitidas por focos cercanos entre sí. En realidad, reproducirá la distribución de intensidades creadas por una onda escindida en dos partes, partes que luego interfieren sobre la pantalla, del otro lado de la barrera. Es forzoso concluir que cada electrón, conforme volaba desde la fuente que lo emitió hacia la pantalla, tuvo que "percibir" *ambas* rendijas, e *interfirió consigo mismo,* tal como haría una onda, depositándose empero como una rana, es decir, señalando en la pantalla su presencia mediante un punto, sin dejar rastro de su reciente desdoblamiento de personalidad.

El dilema es, por tanto, que los electrones se comportan como si a un tiempo estuvieran difundidos por el espacio y localizados en un punto, esto es, como si fueran simultáneamente ondas y partículas. A nivel macroscópico, semejante volubilidad y falta de carácter es inconcebible. No tenemos dificultad en distinguir, pongamos por caso, una naranja de una ondulación en una laguna. (En caso de que el lector tema encontrarse un día en situación apurada, que le obligue a decidir rápidamente si algo es una ondulación o una naranja, recorte y guarde en la cartera el siguiente discriminador de naranjas/ondulaciones. Una naranja es sólida, tangible y, sobre todo, se encuentra siempre en algún *lugar* determinado. Una ondulación carece de masa, es intangible y se difunde por doquiera.)

Si tenemos hambre y queremos saber dónde se encuentra nuestra naranja, basta echar un vistazo alrededor, y en cuanto nuestros ojos perciban algunos fotones con aroma de toronja sabremos dónde encontrarla. Esos fotones han rebotado en la naranja y penetrado en nuestros ojos. Supongamos, sin embargo, que, por alguna razón, nuestra naranja fuera achicándose más y más. De contraerse hasta el tamaño de las mitocondrias, su diámetro sería sensiblemente igual a la longitud de onda de la luz anaranjada. Sería entonces capaz de difractar la luz, y ya no podríamos encontrarla tan fácilmente. Si continuara reduciéndose, sucedería algo terrible.



El gato de Schrödinger ayuda a desvelar una paradoja de la mecánica cuántica

Los fotones individuales que incidieran en ella, estando provistos de energía y cantidad de movimiento, empezarían a zarandearla de acá para allá. Empezarían, pues, a cobrar importancia las propiedades corpusculares de los fotones. La verdad es que una naranja del tamaño de un electrón sería muy difícil de localizar. Si estuviéramos ansiosos de comer naranjas valdría más que empezásemos a buscar una mayor.

Desdichadamente, no es posible hacer lo mismo con los electrones, pues no los hay más grandes. Para dar con un electrón, lo único factible es bombardearlo con otras partículas o con fotones. Dado que tanto fotones como partículas exhiben rasgos corpusculares y rasgos ondulatorios, los efectos del bombardeo tendrán en uno y otro caso consecuencias semejantes. Cuando se desea localizar con precisión una partícula es necesario usar ondas cuya longitud sea del orden de magnitud de la partícula (o menor). Podemos comprenderlo intuitivamente pensando en cómo quedarían afectadas ondas acuáticas por un pedazo de madera flotante. Cuando las ondas sean de longitud muy grande, ni siquiera se apercibirán del pecio; sólo cuando su longitud vaya acercándose al tamaño del cuerpo empezarán a verse afectadas por él.

Por consiguiente, para encontrar nuestro electrón harán falta fotones de muy pequeña longitud de onda. Tal longitud es, por otra parte, inversamente proporcional a la cantidad de movimiento con que estén dotados, y de ahí las dañinas consecuencias de la ecuación de De Broglie. Para comprar longitudes de onda reducidas tenemos que pagar caro en cantidad de movimiento. Y por ello, aunque nuestro interés sería que las ondas, al difractarse en la partícula, lo hicieran con la mayor suavidad, para no modificar la posición de aquélla, resulta en realidad imposible lograrlo sin transmitir a la partícula cierta cantidad de movimiento. De aquí el dilema: o bien somos con ella sumamente delicados (grandes longitudes de onda), y no vemos bien el electrón, o bien somos bruscos (fotones de cortas longitudes de onda) y desviamos por completo al electrón de su trayectoria inicial.

Heisenberg llevó a cabo un penetrante estudio de esta perversa consecuencia de la teoría de De Broglie, descubriendo, para completa perplejidad de los amantes de la epistemología de todo el mundo, que conocer exactamente la posición de una partícula conlleva renunciar a toda esperanza de conocer con precisión su cantidad de movimiento, y que conocer su cantidad de movimiento exige renunciar a conocer su localización. Y que conocer imperfectamente cualquiera de estas magnitudes impone automáticamente límites a la precisión con que podemos llegar a conocer la otra. Una reciente pintada expresa la idea: "Heisenberg pudo haber estado aquí." El principio puede plasmarse en una desigualdad, que el propio Heisenberg dedujo. Al tratar de establecer la situación de una partícula existirá una indeterminación, una incertidumbre, que convendremos en llamar Δx. Habrá asimismo una indeterminación en el valor de la cantidad de movimiento, denotada Δp. El principio de incertidumbre, o de indeterminación, de Heisenberg está expresado en la desigualdad $\Delta x \cdot \Delta p \geqslant \hbar/2\pi$.

Es necesario hacer notar en esta fórmula un par de cosas. Ante todo, la presencia de la misteriosa constante de acción de Planck, $\hbar$, claro índice de que el efecto es consecuencia de la dualidad ondulatorio-corpuscular de la materia, y que nada tiene que ver con la idea de que un posible *observador* perturbe el

fenómeno en observación. Segundo, hacer ver que, incluso con esta restricción epistemológica, sí es posible medir con tanta precisión como se desee bien la posición, bien la cantidad de movimiento de la partícula; lo que no es posible es lograr precisión arbitraria en *ambas* medidas.

En pocas palabras, suponer que el principio de incertidumbre es válido para observadores macroscópicos que efectúan mediciones macroscópicas es perder completamente el significado del principio de indeterminación. Por ejemplo, no es consecuencia del principio de indeterminación que los psicólogos, al estudiar los fenómenos de cognición humana, estén en principio limitados por el hecho de estar observando seres humanos, capaces a su vez de efectuar observaciones de igual carácter. No; los límites con que aquí se tropieza son más bien deficiencias en el conocimiento del cerebro humano, o la falta de ingenio para diseñar experimentos, y en nuestros días, probablemente, las dificultades de financiación.

Si deseáramos conocer más sobre las anomalías gramaticales del habla de la sujeto *M* habría en principio muchas formas de examinarla sin que se pusiera alerta o se sintiera en ridículo. Por citar sólo unas cuantas ideas estrafalarias: con un presupuesto de algunos cientos de miles de pesetas podríamos instalar micrófonos ocultos en su domicilio y registrar sus conversaciones. Invirtiendo unos cuantos millones podríamos hacernos construir diminutos transmisores de radio y, secretamente, coserlos en las solapas de todas sus prendas. Quizá, con presupuestos de decenas o centenares de millones lográsemos convencerla de que se sometiera a una pequeña operación quirúrgica, y, ya bajo los efectos de la anestesia, implantar en el cerebro electrodos con los que supervisar las zonas del habla sin que ella lo supiera. Si se considera que el contacto material con el tejido cerebral puede perturbar sus hábitos lingüísticos, puede que sea necesario esperar hasta que se nos ocurra cómo examinar los procesos neuronales a distancia. Es evidente que todas estas posibilidades son absurdas, pero la tesis es que *en principio* podemos estudiar fenómenos macroscópicos con grado de precisión arbitrario.

En resumen, el principio de incertidumbre no afirma que el observador siempre interfiera con lo observado; lo que sí afirma es que, a tamaños sumamente pequeños, la dualidad ondulatorio-corpuscular de la materia y, en particular, del objeto empleado para la observación, cobra importancia. El principio de incertidumbre no es una ley epistemológica concerniente al acto de observar, sino consecuencia de que la constante de Planck no sea nula.

El principio de incertidumbre no es tampoco un axioma de la física cuántica; se trata de un principio deducido, al igual que la muy famosa ecuación $E=mc^2$, de Einstein, que fue deducida de ecuaciones más fundamentales de la teoría de relatividad. Ambas fórmulas son útiles por su concisión, por ir derechas al meollo. Es frecuente que los físicos se sirvan del principio de incertidumbre como si se tratara de una regla empírica. Cuando se quiere estimar el valor aproximado de la cantidad de movimiento que tendrá un neutrón emitido por un núcleo que se desintegra a partir de un estado excitado, el valor $p=\hbar/x$ viene como traído por el rabo, siendo x el orden de magnitud del núcleo que confina al neutrón. Se podría concebir que, al estar confinado en el núcleo, la incertidumbre de *posición* del neutrón es muy pequeña, y que el neutrón está chocando y rebotando contra las paredes de su "jaula" con una incertidumbre de *cantidad de movimiento* que compensa la exactitud del otro dato. Cuando el neutrón escape, una estimación grosera de la cantidad de movimiento que posea estará dada por esta cota de incertidumbre.

Al examinar los fundamentos de la mecánica cuántica, resulta evidente que el principio de incertidumbre es más que una limitación epistemológica impuesta a los observadores humanos; se trata en realidad de un reflejo de la incertidumbre de la naturaleza misma. En mecánica cuántica, la realidad no se corresponde con la realidad macroscópica. No es simplemente que nosotros *no podamos* conocer simultáneamente la cantidad de movimiento y la posición de una partícula; ¡es que la partícula ni siquiera *tiene* posición y cantidad de movimiento definidas unívocamente a un mismo tiempo!

En mecánica cuántica, las partículas se representan mediante "funciones de onda". La función de onda de una partícula expresa las probabilidades de que la partícula se encuentre acá, allá o en algún otro lugar; de que la partícula se dirija al norte o al sur, etcétera. La función de onda asocia así a cada punto del espacio una "amplitud de probabilidad", que varía con el tiempo, de que la partícula se encuentre en él. Alternativamente, calándonos unas "gafas matemáticas" adecuadas podemos obtener una amplitud de probabilidad para cada valor instantáneo de la cantidad de movimiento. Todos los hechos relativos a la partícula se encuentran implícitos

en su función de onda. En la terminología más reciente, en lugar de funciones de onda suele hablarse de "estados".

En física clásica, las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la partícula hacen intervenir directamente magnitudes tales como x y p —posición y cantidad de movimiento—, y los valores de x y p están bien definidos en todo momento; sus cambios obedecen a las fuerzas que actúan sobre la partícula. Provistos de tales ecuaciones dinámicas, los físicos pueden determinar por adelantado las posiciones y cantidades de movimiento de sistemas físicos sencillos y estables con increíble precisión. Así ocurre, por ejemplo, con los movimientos planetarios, que incluso los antiguos aprendieron a predecir con gran exactitud. Tenemos ejemplos más recientes en los juegos electrónicos "espaciales", donde las naves siderales y los planetas quedan sometidos a la atracción gravitatoria de alguna estrella y entran en órbita ante nuestros ojos, describiendo elipses perfectas sobre la pantalla. Las ecuaciones subyacentes a este tipo de movimiento son ecuaciones diferenciales, y una de sus propiedades evidentes (tanto así, que la damos por segura) es que los movimientos por ellas descritos son suaves. Ni los planetas ni las naves espaciales saltan repentinamente de sus órbitas. Los movimientos no presentan discontinuidades súbitas.

En mecánica cuántica, ni x ni p intervienen en las ecuaciones del movimiento en la misma forma que en mecánica clásica. En lugar de estas magnitudes, es la función de onda lo que evoluciona con el tiempo, obedeciendo a una ecuación diferencial: la ecuación de Schrödinger (en mecánica cuántica no relativista). Conforme transcurre el tiempo, los valores de la función de onda van "rizándose" a través del espacio, lo mismo que la onda acuática riza la superficie de un lago. Tal descripción parece sugerir que los fenómenos cuánticos, lo mismo que los no cuánticos, evolucionan suavemente, sin saltos. En cierto sentido, así sucede. La suave precesión de una partícula eléctricamente cargada que gira sobre sí misma, inmersa en un campo magnético, puede servirnos de ejemplo. Es el equivalente electromagnético de la precesión de un giróscopo en el seno de un campo gravitatorio. Y, en efecto, los parámetros que caracterizan el estado de la partícula en rotación van cambiando suavemente, sin saltos bruscos.

Sin embargo, y la objeción cobra ahora gran tamaño, existen excepciones a este suave comportamiento, y estas excepciones parecen formar parte tan esencial de la mecánica cuántica como puedan serlo los estados de evolución suave. Tales excepciones se presentan en el acto de efectuar mediciones, o en la interacción de un sistema cuántico con otro macroscópico. En la forma más común de presentar la mecánica cuántica, a ciertos sistemas conocidos como "observadores" se les confiere un *status* causal privilegiado (sin especificar más qué son los "observadores" y, en particular, sin aclarar si la cualidad de "tener consciencia" es o no requisito para ser "observador"). Para elucidar esta cuestión echaremos una ojeada a la llamada "parábola del grifo".

Imaginemos un grifo de agua, con dos llaves de control, marcadas respectivamente F y C, que podemos hacer girar indefinidamente. Del grifo está manando agua continuamente, pero el sistema tiene una extraña propiedad: el agua sale totalmente caliente, o fría del todo; no hay posibilidad de graduar estados intermedios. Los dos estados del agua serán llamados "estados característicos", y también, estados propios y auto-estados. La única forma de saber en cuál de sus dos estados se encuentra el agua es metiendo la mano bajo el chorro. En realidad, en mecánica cuántica ortodoxa, la cuestión es más delicada, pues es el propio acto de meter la mano lo que *provoca* en el agua la adopción de uno de sus dos auto-estados. Hasta ese momento se dice que el agua está en *superposición* de estados.

La probabilidad de que el agua salga fría depende de las posiciones de las llaves. Evidentemente, si sólo abrimos la válvula C siempre obtendremos agua caliente, y si únicamente abrimos la F es seguro que sacaremos agua fría. Sin embargo, abriendo en mayor o menor medida ambas válvulas se creará una superposición de estados. Ajustando las llaves a una determinada posición y ensayando reiteradamente el resultado se puede medir la probabilidad de que se obtenga agua fría con este ajuste. Podemos entonces modificar la apertura de las válvulas, y repetir la serie de experimentos. Es de esperar que exista una posición intermedia donde sea equiprobable sacar agua caliente y sacar agua fría, es decir, donde sacar una u otra equivalga a lanzar una moneda a cara o cruz. (Este grifo "cuántico" nos recuerda, tristemente, más de una ducha.) Finalmente, podríamos llegar a reunir suficiente número de datos y construir una gráfica de la probabilidad de sacar agua fría en función de las posiciones de las llaves.

Los fenómenos cuánticos son análogos al descrito. Los físicos pueden trastear mandos y controles y situar los sistemas a estudiar en superposición de

estados, similares a las del sistema agua fría-caliente. Mientras no se realicen *mediciones* en el sistema, el físico no puede saber en qué auto-estado se encuentra el sistema. De hecho, puede demostrarse que, en un sentido fundamental, ni el propio sistema "sabe" en qué estado se encuentra, y que sólo se decide (al azar) por uno de ellos en el instante en que el observador "mete la mano" para probar el agua, por así decirlo. Hasta el momento de la observación, el sistema actúa como si *no* estuviera en un estado característico. A todos los efectos prácticos, para todos los fines teóricos, y en realidad, para *todo* propósito, el sistema no se encuentra en un estado característico.

Es posible idear gran cantidad de experimentos con el agua que mana de nuestro grifo cuántico, al objeto de determinar si el agua está caliente o fría, sin necesidad de meter directamente la mano bajo el chorro. (Suponemos, claro, que no hay indicios que revelen la temperatura del agua, como podría ser el desprendimiento de vapor.) Podríamos, por ejemplo, llenar nuestra máquina de lavar con agua de este grifo cuántico; pero, de todas formas, seguiríamos sin saber si nuestro jersey de lana ha encogido o no hasta abrir la lavadora (lo que significa realizar una medición a cargo de un observador dotado de consciencia). Podríamos preparar una infusión de té, pero no sabríamos si el té está caliente o frío hasta degustarlo (nueva medición, y observador consciente). La cuestión crítica estriba en que el jersey y el té, que no poseen por sí mismos *status* de observador consciente, han de seguir el juego y, lo mismo que el agua, admitir superposiciones de estados: encogimiento o no del jersey, té caliente o té frío.

Pudiera parecer que todo esto poco tiene que ver con la física *per se;* más bien recuerda las discusiones bizantinas del tipo: "¿Hace ruido un árbol al caer en el bosque, si no hay nadie presente para oírlo?" La mecánica cuántica le da a tales acertijos un nuevo giro; en efecto, hay consecuencias de la realidad de las superposiciones que tienen trascendencia a nivel de observación, consecuencias que son diametralmente opuestas a las que se producirían si un estado, en apariencia mixto, siempre fuese en realidad un verdadero estado característico, que estuviese meramente ocultando su identidad a los observadores hasta el instante de la medición. Expresado burdamente, un chorro de agua quizá caliente/quizá fría se comportaría de distinta forma que un chorro verdaderamente caliente o verdaderamente frío, pues las alternativas "interfieren" entre sí. Tal hecho sólo quedará de manifiesto tras enorme número de lavados de jersey y de infusiones de té, al igual que en el experimento de las dos rendijas son necesarias gran número de arribadas de electrones para revelar las pautas de interferencia de las trayectorias alternativas. Los lectores interesados deberían consultar la exposición que sobre estas diferencias se da, bien en *The Character of Physical Law,* de Feynman, o bien, si se desea mayor detalle, en *The Feynman Lectures on Physics,* de Richard P. Feynman, Robert B. Leighton y Matthew Sands (Addison-Wesley Publishing Co., 1973-75).

El apurado trance a que es sometido el gato de Schrödinger (Erwin Schrödinger fue, con su colega Werner Heisenberg, uno de los pioneros de la mecánica cuántica) aún lleva más allá esta idea: incluso un gato pudiera encontrarse en superposición de estados mecánico-cuánticos hasta la intervención de un observador humano. La parábola del desdichado gato es como sigue. Hay una caja preparada para alojar al gato. Dentro de la caja hay una minúscula muestra de radio. También hay dentro de la caja un detector de radiación que percibirá cualesquiera desintegraciones de átomos de radio de la muestra. La muestra ha sido elegida de tal manera que haya iguales probabilidades de que se produzca al menos una desintegración en el lapso de una hora como de que no se produzca ninguna. De presentarse alguna desintegración, se cerraría un circuito, que a su vez determinaría la ruptura de una vasija con un líquido letal que, al derramarse en el piso de la caja, mataría al gato.

Se coloca al gato en la caja, se asegura la tapa, y se deja transcurrir una hora. Al cabo, un observador humano se acerca a la caja, la abre y comprueba lo sucedido. Según ciertos enfoques extremosos (que el lector debe tener presente no son los habituales en mecánica cuántica) tan sólo *en ese instante* se vería obligado el sistema a asumir uno de sus dos posibles estados característicos —gato vivo o gato muerto— que están conjuntamente representados como superposición de estados en la función de onda del sistema. (Observemos que es necesario que la incertidumbre y la aleatoriedad de comportamiento del sistema sea de origen cuántico; aquí se trata de la desintegración de núcleos de radio. Este experimento conceptual carecería de todo interés si en lugar de la muestra de radio se usara una ruleta como generador de azar.)

Se podría objetar: "¡Un momento! ¿Acaso un gato vivo no haría en este caso el papel de observador consciente tan bien como pudiera hacerlo un humano?" Probablemente sea así, pero notemos que este gato es, posiblemente, un gato muerto, y en tal caso malamente podría asumir la función de observador. En efecto, hemos creado sobre el gato de Schrödinger una superposición de estados, uno de los cuales tiene *status* de observador, mientras que el otro carece de él. ¿Y ahora, qué hacemos?

A muchos físicos, esta distinción entre sistemas con *status* de observador y sistemas que no lo poseen les resulta artificial, cuando no repugnante. Además, la idea de que la intervención de un observador provoque un "colapso de la función de onda" —el salto brusco a un estado propio puro, elegido al azar— introduce un elemento de capricho en las leyes últimas de la naturaleza. Durante toda su vida, Einstein tuvo la convicción de que Dios no juega a los dados ("Der Herrgott würfelt nicht").

Un intento radical para salvar a un tiempo la continuidad y el determinismo en mecánica cuántica es el conocido como "interpretación en mundos múltiples", propuesto por vez primera en 1957 por Hugh Everett III. De acuerdo con esta extravagante teoría, no hay ningún sistema que salte discontinuamente a estados propios. Lo que sucede es que la superposición evoluciona sin rupturas, desplegando paralelamente sus diversas ramificaciones. Cada vez que sea necesario, el sistema retoña en nuevas ramas que portan las diversas variantes recién creadas. Por ejemplo, en el caso del gato de Schrödinger hay dos ramas, que se desarrollan paralelamente. "Bueno", podríamos preguntar, "¿qué le sucede al gato? ¿Se siente *el gato* con vida, o se siente ya muerto?" Sin duda quedaríamos sin respuesta, pero Everett diría: "Eso dependerá de la rama a que se atienda. En una rama el gato se siente vivo, mientras en la otra ya no hay gato que pueda sentir nada". Nosotros sentimos en cambio que nuestra intuición comienza a rebelarse, y preguntamos entonces: "¿Y qué hay de los instantes inmediatamente anteriores a que el gato de la rama letal muriera? ¿Cómo se sentía el gato *entonces*? Sin duda no sería capaz de sentirse vivo y saberse muerto simultáneamente. ¿Cuál de ambas ramas contiene, pues, al auténtico gato?"

El problema cobra toda su viveza cuando nos damos cuenta de las implicaciones que con respecto a nosotros mismos contiene semejante teoría. Pues en cada punto de ramificación "cuántica" de nuestras vidas (que habrán sido billones y billones) nos hemos escindido

en dos o más de nosotros mismos, cada uno a horcajadas en ramas paralelas, pero inconexas, pertenecientes a una gigantesca función de onda universal. (Este término pretende describir la enorme función de onda capaz de representar todas las partículas de todos los universos paralelos.) En el punto de su artículo donde surge esta crítica dificultad, Everett inserta, con toda tranquilidad, a pie de página, la siguiente nota:

"Nos tropezamos aquí con una dificultad lingüística. Pues mientras antes de la observación teníamos un único estado para el observador, tras ella hay para el observador cierto número de diferentes estados, que se presentan todos en superposición. Cada uno de estos estados individuales es un estado para un observador, y así podemos hablar de los diferentes observadores descritos por diferentes estados. Por otra parte, está interviniendo el mismo sistema físico, y, desde tal punto de vista, se trata del *mismo* observador, que se encuentra en diferentes estados para diferentes elementos de la superposición (es decir, ha tenido diferentes experiencias en los distintos elementos de la superposición). En este contexto, nos serviremos del singular cuando pretendamos destacar que sólo estamos refiriéndonos a un único sistema físico (Everett alude aquí al universo que va ramificándose múltiplemente), y del plural, en cambio, cuando pretendamos cargar el acento en las diferentes experiencias correspondientes a los elementos individuales de la superposición. (*Exempli gratia,* 'El observador efectúa una medición de la magnitud *A,* tras la cual cada uno de los observadores de la superposición resultante ha percibido un estado característico'.)"

Todo esto se afirma con auténtica "cara de póker". El problema de la conciencia subjetiva del observador no se trata para nada; ni siquiera lo barre bajo la alfombra. Seguramente lo considerará carente de significado.

Basta, empero, preguntarse, ¿por qué me siento yo únicamente en un mundo? Bien, de acuerdo con el enfoque de Everett no es así: nosotros percibimos todas las alternativas simultáneamente. Lo que sucede es, sencillamente, que *este* yo que recorre *esta* rama concreta no experimenta todas las alternativas. Semejante afirmación no puede ser más chocante. En su famoso relato "El jardín de los senderos que se bifurcan", Jorge Luis Borges describe una fantástica visión del universo. Héla aquí:

"*El jardín de los senderos que se bifurcan* es una imagen incompleta, pero no falsa, del universo tal como lo concebía Ts'ui Pên. A diferencia de Newton y Schopenhauer, su antepasado no creía en un tiempo uniforme, absoluto. Creía en infinitas series de tiempos, en una red creciente y vertiginosa de tiempos divergentes, convergentes y paralelos. Esa trama de tiempos que se aproximan, se bifurcan, se cortan o que secularmente se ignoran, abarca *todas* las posibilidades. No existimos en la mayoría de esos tiempos; en algunos existe usted y no yo. En éste, que un favorable azar me depara, usted ha llegado a mi casa; en otro, usted, al atravesar el jardín, me ha encontrado muerto; en otro, yo digo estas mismas palabras, pero soy un error, un fantasma."

Podemos ver esta cita al principio de *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics: A Fundamental Exposition,* dirigido por Bryce S. DeWitt y Neill Graham (Princeton University Press, 1973). No deja de ser curioso encontrar tema tan extravagante infiltrado en el corazón mismo de la ciencia que pasa por ser la más estable y menos errática de todas.

Pero, en cierto modo, ello no debería sorprendernos. Existe clara conexión entre los mundos imaginarios que pueblan nuestras mentes y los mundos alternativos que evolucionan paralelamente y sin interferencia con el que nosotros experimentamos. Es evidente que, al deshojar la margarita "...me quiere, no me quiere, me quiere...", el proverbial enamorado está desarrollando en su mente dos mundos (cuando menos) fundados de muy distinta manera en otros tantos modelos de conducta de su amada. ¿O quizá sería más exacto decir que hay *un* solo modelo mental de la adorada, que se encuentra en superposición de estados mecánico-cuántico-mentales?

Y cuando un novelista considera simultáneamente cierto número de posibles desarrollos de un relato, ¿acaso no se encuentran sus personajes —en sentido metafórico— en superposición mental de estados? Si la novela nunca llegara a plasmarse en papel, quizá los personajes pudieran proseguir su evolución y desarrollar sus biografías múltiples en el cerebro de su autor. Más aún, sería inconcebible preguntar cuál sería en este caso la versión *auténtica,* pues todos los mundos serían igualmente genuinos.

Quizás una manera de concebir la función de onda universal sea imaginarla como la mente —o si se quiere, el cerebro— de Dios, en cuyo seno todas las posibles ramificaciones tendrían desarrollo. Nosotros seríamos entonces meros subsistemas del cerebro divino, y *estas* versiones de nosotros mismos no serían más auténticas ni privilegiadas de lo que pueda tener de más genuina nuestra galaxia con respecto a todas las demás del Universo. Concebido de esta forma, el cerebro divino evoluciona determinísticamente y sin discontinuidades, como siempre mantuvo Einstein. El físico Paul Davies, escribiendo precisamente sobre este tema en su reciente obra *Other Worlds* (Simon and Schuster, 1980), dice: "Nuestra consciencia va trazando aleatoriamente una ruta a lo largo de las vías —en permanente ramificación— del cosmos, y por ello, somos nosotros, y no Dios, quienes jugamos a los dados."

Todas estas consideraciones dejan sin respuesta el enigma fundamental, que todos tenemos necesidad de plantearnos: ¿por qué está mi conciencia de mí mismo haciéndome sentir unitario, y por qué está propagándose a lo largo de esta rama concreta, en lugar de hacerlo por cualquiera otra? ¿Qué ley subyace a las elecciones aleatorias que me hacen proseguir por esta rama? ¿Por qué no sigue la conciencia de mí mismo al costado de mis otros yo, cuando éstos se escinden y siguen otras rutas? En cierto modo, es casi como preguntar ¿por qué siento yo *mis* sentimientos, y no los de algún otro? ¿Qué cosa me liga *a mí* al punto de vista de *este* cuerpo, que evoluciona por *esta* rama del universo en *este* momento concreto? La cuestión es tan básica y fundamental que casi parece desafiar su clara enunciación verbal. Y no parece que la respuesta vaya a provenir de la mecánica cuántica. De hecho, éste es exactamente el colapso de la función de onda, que asoma ahora por la otra punta de la alfombra bajo la cual fue barrida por Everett, convertido esta vez en un problema de identidad personal, no menos paradójico que el problema que vino a sustituir.

Todavía podemos caer más profundamente en las simas de la paradoja, al darnos cuenta de que hay ramas de esta gigantesca y frondosamente ramificada función de onda universal en las que no existe Werner Heisenberg, no existe Max Planck, no existe Albert Einstein; ramas todas ellas donde no existe evidencia alguna de mecánica cuántica, ramas donde no hay principio de indeterminación ni interpretaciones de mundos múltiples de la mecánica cuántica. Hay ramas donde el relato de Borges no ha sido escrito, ramas en las que este artículo no se ha escrito. Hay incluso una rama donde este artículo fue escrito de cabo a rabo exactamente como usted lo está viendo aquí, salvo en que terminaba por una palabra distinta.

Taller y laboratorio

Anamorfosis: cómo se forman, cómo debemos contemplarlas

Jearl Walker

Las anamorfosis son ilustraciones que ofrecen una imagen deforme y confusa, de suerte que lo representado sólo puede apreciarse si se observa desde un punto de vista particular, no precisamente el habitual. Hay pinturas y fotografías de esta naturaleza que deben contemplarse casi desde el borde, o mediante un cono o cilindro reflector. En el Renacimiento, estas ilustraciones solían constituir motivo de entretenimiento, función que siguen cumpliendo en nuestros días. Interesa su forma de crearlas y contemplarlas, por cuanto se encuadran en un tema más amplio: la naturaleza de la perspectiva y de la percepción visual.

Han llegado a mis manos algunos ejemplares de anamorfosis fotográficas realizadas por David G. Stork, estudiante graduado en percepción visual por la Universidad de Maryland, College Park, quien utiliza negativos en blanco y negro o diapositivas en color para obtener fotogramas anamórficos. Suele conseguirlos colocando los negativos en una ampliadora. Entonces, la luz que dirige a través del negativo atraviesa un objetivo y cae sobre el papel fotográfico, que revela luego para obtener la fotografía definitiva. En la trayectoria de la luz, Stork monta un cono brillante para que refleje la luz hacia zonas del papel a las que, de suyo, no tendría que ir a parar; por supuesto, en el centro de estas copias en positivo quedan unas zonas sin impresionar, que corresponden a la base circular del cono.

Aunque no es fácil reconocer la copia resultante, puede recuperarse la perspectiva original con ayuda del propio cono. Para ello, lo colocamos en el centro de la foto, y el observador contempla la perspectiva desde arriba, a una altura conveniente, con un solo ojo. La superficie lateral del cono produce entonces una imagen reflejada de la foto con la perspectiva de la escena original restituida.

Sobre la copia en positivo, la imagen procedente del negativo se deforma de dos maneras. La región de la imagen inmediata al centro aparece próxima al exterior de la foto. A la inversa, la región inmediata al exterior del negativo aparece, en la foto, próxima a la base del cono. Esta inversión radial entre centro y perímetro origina la curiosa figura que aparece en el fotograma.

El otro tipo de deformación de la imagen afecta a su anchura angular alrededor del centro de la foto. Las porciones de la imagen que se proyectan en la proximidad del límite exterior de la foto se reparten circularmente en torno al centro de ésta, mejor que las porciones que se proyectan en la proximidad de la base del cono. Resultado de ello: se pierden la mayoría de los indicios que sugerirían la perspectiva normal.

El equipo necesario para las anamorfosis fotográficas de Stork es muy simple. El trabaja con un cono metálico macizo, mecanizado a la medida, que puede sustituirse por una hoja de mylar arrollada en dicha forma geométrica. (Las hojas pueden comprarse en tiendas de artículos para aficionado o donde expendan cometas.) Además del diafragma de abertura variable de la ampliadora, se necesita un medio para regular la anchura del haz luminoso encima del cono; podemos echar mano, a tal fin, de otro diafragma de abertura variable, montado en un soporte de laboratorio. Un sustituto de este último lo hallaremos en una serie de cartones, dotado, cada uno, de un orificio de distinto diámetro. Componiendo adecuadamente estos cartones, el fotógrafo puede regular la exposición casi con la misma perfección con que lo haría con un diafragma de abertura variable.

Se pone el cono sobre el papel fotográfico mientras el artista trabaja a oscuras. Para ello, Stork ha conseguido un ocultador de cartón que se ajusta al soporte del papel. En el centro del ocultador hay un orificio del mismo diámetro que la base del cono. Stork coloca, entonces, al tacto, el cono en el orificio y luego levanta el ocultador sin que éste toque el cono.

El procedimiento para impresionar el papel fotográfico es el siguiente. Se introduce el negativo en la ampliadora, se apagan las luces, se saca una hoja de papel fotográfico de su caja y se coloca en el soporte de la ampliadora. Ponemos el ocultador sobre el papel. Situado el cono en el orificio, se separa el ocultador del papel, levantándolo sin mover el cono. Y para impresionar el papel, se enciende la luz de la ampliadora.

La foto necesita varias exposiciones, porque la luz incidente sobre la zona del papel próxima a la base está más concentrada que la luz que llega al límite exterior del papel. El tiempo de exposición para el papel cercano a la base es el normal; para el papel cercano al límite exterior, se tardará unas 15 o 20 veces más. Stork logra unas exposiciones casi correctas efectuando la primera con una abertura relativamente grande, montada en el soporte de laboratorio. Esta abertura puede ser la del diafragma de abertura variable, o bien la de un gran orificio practicado en un cartón. Realiza la última exposición con una abertura bastante reducida que limita la luz al vértice del cono. Así, puesto que esta zona envía la luz hacia los límites externos del papel, sólo queda expuesto su perímetro.

Empieza por la abertura mayor. La va estrechando paulatinamente de manera que la zona de cono iluminada sea cada vez menor. (Reduce la abertura del diafragma o utiliza cartones con orificios progresivamente menores.) Así prosigue hasta que la zona iluminada queda confinada al perímetro del papel. Importa que, en la primera exposición, el círculo de luz no abarque más allá de la base del cono; si el círculo fuera mayor, a la superficie del papel cercana al cono llegaría luz no reflejada por éste y habría que desechar la foto porque no constituiría una imagen fiel y resultante exclusivamente de la reflexión.

Nadie espere dominar, a la primera, el cambio de aperturas, ni piense que va a realizar las exposiciones sin ensayo previo. Si quieren ahorrarse gastos extra en sus experimentos con las exposiciones, yo recomendaría a los principiantes que trabajen con papel fotográfico en blanco y negro. El propio Stork aconseja que cuando se esté preparado

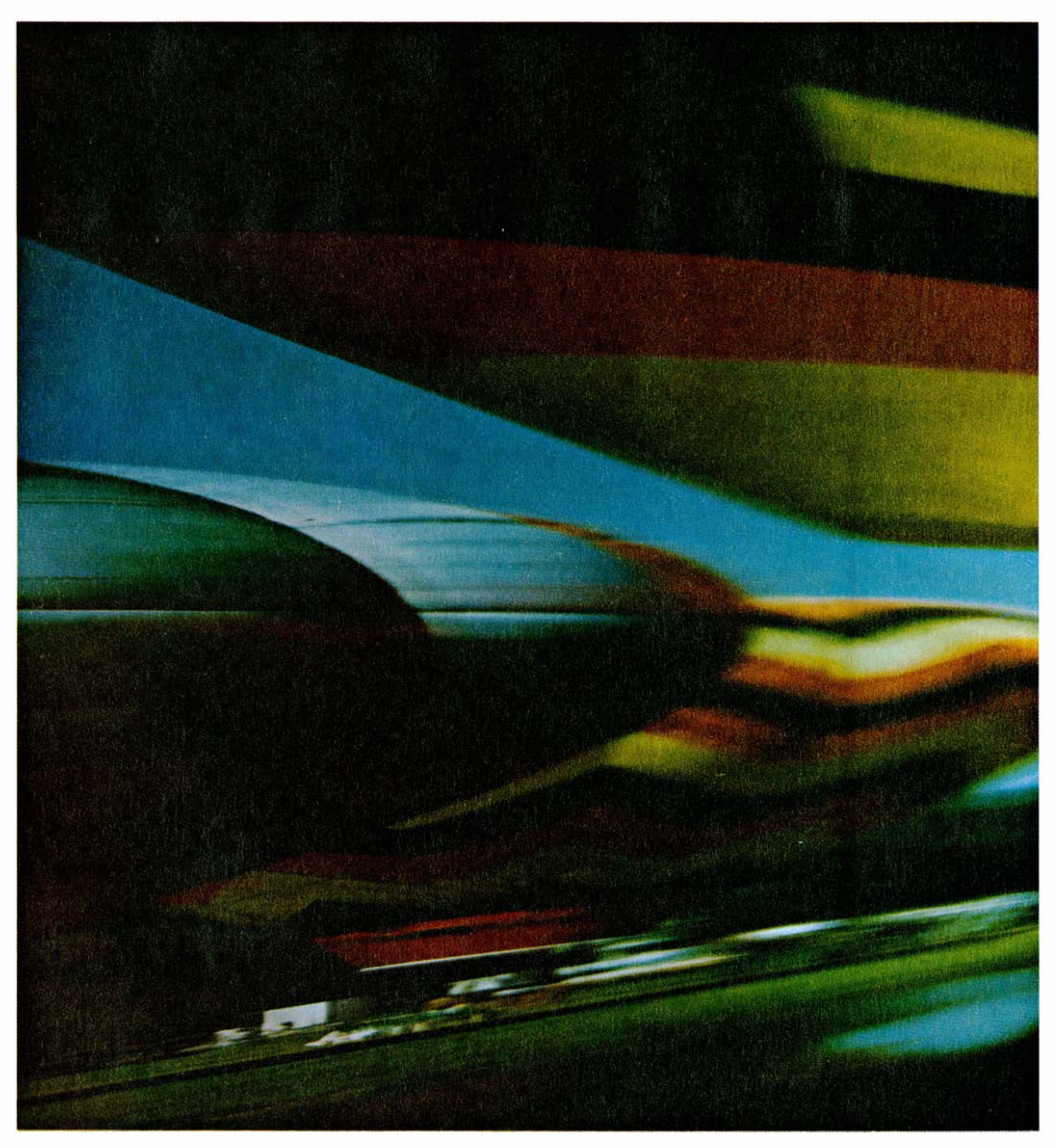
para hacer fotos a partir de diapositivas en color, se trabaje con papel Ilford Cibachrome.

En opinión de nuestro graduado, vale casi cualquier escena para obtener una diapositiva en color. Un buen objetivo es conseguir una foto anamórfica que no se parezca en nada a la escena original. Mejor aún si la diapositiva tiene una zona central relativamente oscura, pues la luz procedente de dicha zona incide principalmente sobre el vértice del cono. No hay cono, ni aunque esté mecanizado, que tenga una punta perfecta. De aquí que la luz reflejada en el vértice se deforme sin ningún control posible.

Si pudiéramos sobreponer el cono sobre la foto terminada, exactamente igual que se encontraba sobre el papel a lo largo de la exposición, la deformación podría romperse, pero esta reposición exacta es laboriosa y no compensa el esfuerzo. Otra dificultad que presenta el vértice es que la luz que refleja hacia el papel es relativamente tenue.

Ambas dificultades pueden obviarse utilizando una diapositiva con una superficie central bastante oscura para que lo reflejado en el vértice contraste menos en el papel.

Stork sugiere que cuando no pueda



Globos de aire caliente: fotografía anamórfica de David G. Stork

mecanizarse un cono metálico, o no podamos conseguir ninguno, se monte mylar sobre un cono de madera macizo. A éste se le añadirá peso taladrándole un agujero en la base e insertando en él un corto trozo de barra metálica. (Ni que decir tiene que el cono no debe moverse durante las reiteradas exposiciones.)

En un artículo recientemente publicado en esta revista se describían deformaciones similares producidas por reflexiones en espejos planos y curvos (véase "Formación de imágenes en los espejos", de David Emil Thomas; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1981). Thomas presentaba allí una clasificación de las deformaciones en función del tipo de espejo empleado. Sobre la superficie de un espejo definía dos ejes perpendiculares, de modo que la clase de reflexión producida en la superficie pudiera clasificarse según el tipo de curvatura de dichos ejes. Por ejemplo, la superficie lateral de un cilindro reflector tiene un eje paralelo a la sección longitudinal del cilindro (este eje atraviesa la superficie lateral yendo de una base a otra) y otro eje (perpendicular al anterior) coincidente con el perímetro circunferencial del cilindro. La superficie, pues, es la combinación de un espejo plano (del eje recto) y un espejo convexo (del eje curvo). Las reflexiones según el eje recto se comportan como lo harían en un espejo plano, y las reflexiones efectuadas según el eje curvo son las correspondientes a un espejo convexo.

En el montaje de Stork la luz se refleja en la superficie lateral de un cono brillante, que puede considerarse tam-



Anamorfosis fotográfica de un rostro femenino obtenida por Stork

bién una combinación de un espejo plano y de un espejo convexo. El eje correspondiente al espejo plano se extiende a lo largo de la superficie lateral, yendo de la base al vértice. El eje del espejo convexo rodea el cono, perpendicularmente al otro eje y paralelamente a la base.

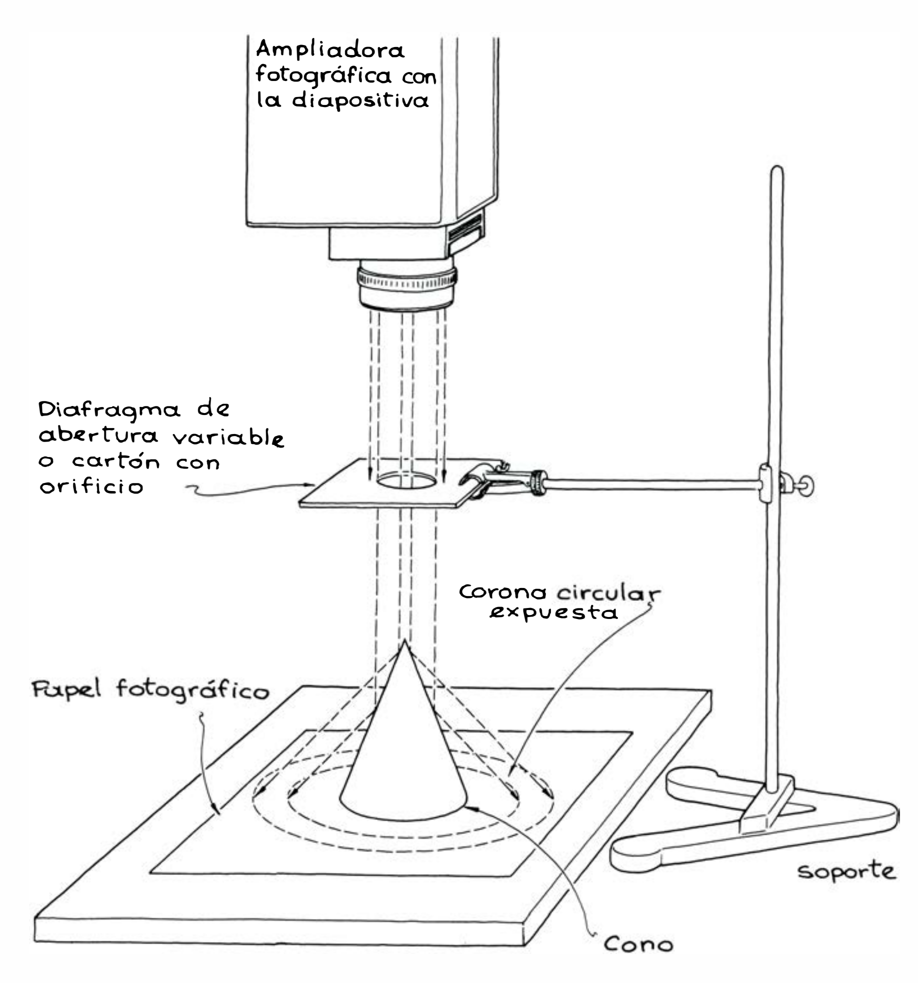
Ahora bien, el cono introduce una complicación: la curvatura del eje convexo varía a lo largo de la superficie lateral. Así, en la proximidad del vértice el eje tiene una gran curvatura, mientras que en la proximidad de la base posee menos curvatura. Pese a ello, las reflexiones producidas en una porción reducida de la superficie lateral pueden considerarse como si procedieran de la combinación de un espejo plano y otro convexo. El eje del espejo plano responde del intercambio de posiciones entre el centro y la periferia de la diapositiva cuando se toma la foto. El eje del espejo convexo da cuenta de la repartición de la imagen circularmente en torno al centro.

Thomas explicaba el modo en que los espejos podían invertir y trastrocar una imagen respecto al objeto que la proyecta. La inversión se refiere al intercambio de colocación entre el objeto y su imagen. Este intercambio puede ser entre lejos y cerca, izquierda y derecha o arriba y abajo. Los espejos planos y convexos sólo invierten lejos y cerca.

Supongamos que mantenemos una vara graduada perpendicularmente a un espejo plano, de forma que el extremo correspondiente al cero toque el espejo. Si nos encontramos en el otro extremo de la vara, el extremo que en la imagen aparece más próximo a nosotros es precisamente el correspondiente al cero. O sea, en la reflexión sobre un espejo plano, lo lejano y lo próximo se invierten. E igual ocurre en los espejos convexos.

Los espejos planos no invierten izquierda y derecha, ni arriba y abajo. Podría pensarse que izquierda y derecha se invierten, pero no es así. Situémonos frente al espejo con una vara graduada sujetándola por la señal de cero con la mano izquierda, y por la señal de un metro con la mano derecha. Observemos la vara reflejada. La imagen de la señal de cero se encuentra también a nuestra izquierda (atención, a nuestra izquierda, no a la izquierda de la persona imagen) y la señal de un metro se halla a nuestra derecha. Es decir, no ha habido intercambio alguno.

Pero, en la persona imagen, izquierda y derecha están intercambiadas. Así, la señal de cero la sostiene la mano derecha y la señal de un metro la sostiene la mano izquierda. A este intercambio



Montaje para realizar fotos anamórficas

Thomas lo llama trastrocamiento. Los espejos planos y los convexos producen un trastrocamiento y una inversión (entre cerca y lejos). Todo espejo que origine un número impar de inversiones trastrueca la lateralidad.

He aplicado el estudio de Thomas al dispositivo de Stork. Para ello, imaginé que en vez de la diapositiva había una gran letra *F* que sostenía un individuo diminuto. Así, podría seguir las variaciones de la lateralidad observando cómo aparecía la imagen de la *F* en la imagen de la persona. A tal objeto, imaginé un cuadrado negro en una esquina de la *F*. En mi experiencia imaginaria los rayos de la luz viajaban, desde la *F* y la persona, a través del objetivo de la ampliadora y luego se reflejaban en la superficie lateral del cono sobre el papel fotográfico.

El objetivo altera la orientación de la *F*. (Con el objetivo seguiré empleando la terminología de Thomas para los espejos.) Esta alteración consiste en que se invierten izquierda y derecha y arriba y abajo, resultando una imagen de la *F* girada 180 grados con relación a su orientación normal. (Aquí no puedo presumir de ser exacto, porque la imagen no se encuentra presente en el espacio comprendido entre el objetivo y el cono; en efecto, los rayos que han atravesado el objetivo aún no se han entrecruzado para crear una imagen enfocada. Pero si la imagen se enfocara sobre una tarjeta intercalada en la luz, se vería lo que les he descrito.) Además, la lateralidad de la imagen se presenta trastrocada; en la disposición inicial la persona sostiene el cuadrado negro con la mano izquierda, pero en la imagen proyectada por el objetivo la imagen de la persona lo sostiene con la derecha.

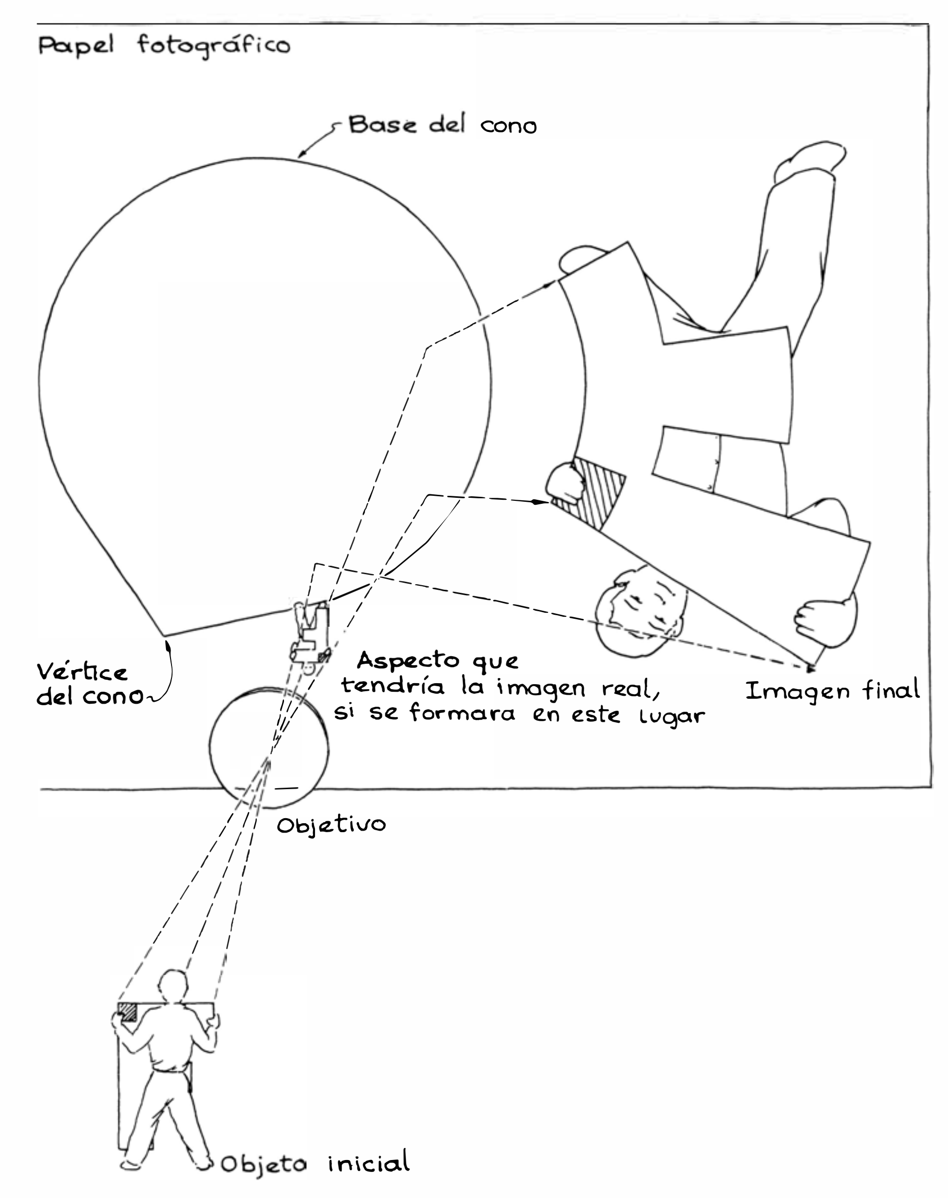
La reflexión de la *F* sobre el cono vendrá a ser la misma que se tendría sobre la combinación de un espejo plano con uno curvo, salvo en un aspecto muy importante: que los rayos reflejados darán sobre una superficie plana antes de llegar a nosotros. Entonces, las reglas que rigen la inversión y trastrocamiento de la imagen propia en un espejo plano deben modificarse. En la imagen final aún se invierte la parte superior con la inferior respecto a la orientación original. Sin embargo, la inversión izquierda-derecha producida por el objetivo se anula debido a la reflexión desde el espejo sobre el papel fotográfi-

co, al igual que el trastrocamiento de lateralidad. En suma, la imagen ha sido invertida de arriba abajo una vez, y no trastrocada.

Cuando la foto obtenida se contempla a través de una reflexión en la superficie lateral del cono, la reflexión procede de hecho de la combinación de un espejo plano con un espejo convexo. Pero las leyes que rigen esta reflexión no son las mismas que se cumplen cuando observamos nuestra imagen reflejada en una tal combinación de espejos plano y convexo. La imagen reflejada es virtual, puesto que los rayos no se cortan para dar una imagen real, sino que divergen al abandonar la superficie lateral del cono.

El ojo del observador recoge los rayos divergentes y los enfoca sobre la retina. La imagen virtual creada por el cono no tiene la misma orientación que la imagen que queda en la foto. Izquierda y derecha están invertidas. Además, la reflexión trastrueca la lateralidad. En la foto, la persona tiene el cuadrado negro en la mano izquierda; cuando la imagen se refleja en la superficie lateral del cono, la persona imagen tiene el cuadrado en la mano derecha.

Stork ha realizado anamorfosis fotográficas valiéndose de otros dos montajes. En uno de ellos hace que la luz procedente de la ampliadora se refleje en un espejo de superficie plana, de modo que los rayos incidan oblicuamente sobre el papel fotográfico, que esta vez coloca desplazado lateralmente, y no directamente debajo de la ampliadora. El resultado es un fotograma deforme, similar a ciertas pinturas anamórficas, que debe contemplarse casi desde el borde para recrear la perspectiva correcta. Por ejemplo, los globos de aire caliente de la ilustración de la página 117 se ven con mayor nitidez si se observa la foto (con un solo ojo) desde un ángulo inclinado, o a través de un espejo plano, que se sostenga ladeado junto a un borde de la foto. Aquí, la secuencia de inversión y trastrocamiento de una imagen en la exposición de la fotografía es la misma que en el cono.



Trastrocamientos e inversiones de una imagen

En un fotograma anamórfico obtenido a través de un espejo plano, el tiempo de exposición debe regularse de suerte que varíe de un lado a otro del papel fotográfico. Las superficies más alejadas del espejo requieren mayor exposición que las más cercanas al mismo. Stork ajusta entonces la exposición intercalando una hoja de cartón entre el espejo y el papel; da comienzo a la exposición colocando el cartón de manea que intercepte la luz por completo. Retira paulatinamente, luego, el cartón hasta que, al final, queda expuesto el borde del papel más cercano al espejo. Así consigue que el tiempo de exposición de las zonas más alejadas sea superior al de las más cercanas.

Nos advierte que, para conseguir un fotograma aceptable, ya sea con un cono reflector o con un espejo, se necesita mucha experimentación y paciencia. El enfoque nunca estará perfectamente ajustado. Si una parte del papel está enfocada habrá otra que no lo esté. Por regla general, Stork ajusta el enfoque para el centro del fotograma anamórfico, o para algún rasgo especialmente importante del mismo.

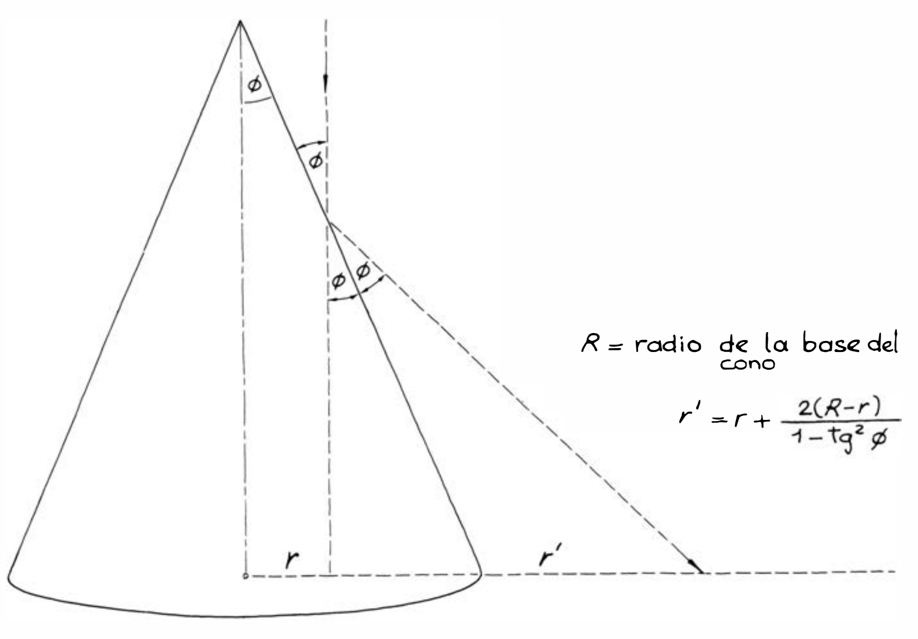
Ajusta también la abertura del diafragma de la ampliadora. Una abertura pequeña (correspondiente a un número f mayor) proporciona mayor profundidad de campo. La reducción de la abertura significa que las exposiciones deberán ser más prolongadas, dado que al papel llegará menos luz; pero la mejora en el enfoque vale el esfuerzo adicional.

Para reflejar los rayos de luz sobre el papel fotográfico, Stork recurre también a un cilindro brillante. En este caso, la luz procedente de la ampliadora se refleja en un espejo plano y luego en el cilindro antes de caer sobre el papel. Para conseguir que la luz procedente del espejo plano caiga únicamente sobre el cilindro, y no directamente sobre el papel, intercepta parte de la luz de suerte que sólo se ilumine el cilindro.

La técnica para impresionar el papel es similar a la seguida con el cono. A oscuras, monta el papel en su soporte y sobre él coloca un ocultador provisto de un recorte circular, donde sitúa el cilindro. Seguidamente, y antes de iluminar el cilindro, separa el ocultador del papel, levantándolo. Si la forma del ocultador es tal que no intercepta parte alguna de la luz reflejada en el cilindro, puede dejarse sobre el papel durante la exposición.

La geometría relacionada con el montaje del cono es muy sencilla. Consideremos un cono cuyo ángulo en el vértice sea conocido. Llamaré φ a la mitad de dicho ángulo, valor que ha de ser inferior a 45 grados; puede servirnos un semiángulo en el vértice de 30 grados. Consideremos ahora un rayo de luz inicialmente vertical. Incidirá sobre la superficie lateral del cono, formando con la misma un ángulo que también valdrá φ. Los rayos de luz se reflejan en las superficies bajo un ángulo igual al de incidencia. Por tanto, en el caso del cono, el ángulo que formará el rayo reflejado y la superficie lateral del cono será también φ.

Supongamos que el centro de la base del cono sea el origen de un sistema de coordenadas. Si no se hubiera interpuesto el cono en el camino del rayo vertical, éste hubiera incidido sobre el papel a una distancia r del centro. Pero con el cono en su lugar, la reflexión cambia la dirección del rayo y éste incide sobre el papel a una distancia del centro mayor que r. Esta nueva distancia puede calcularse mediante la fórmula que aparece en la ilustración superior de esta misma página.



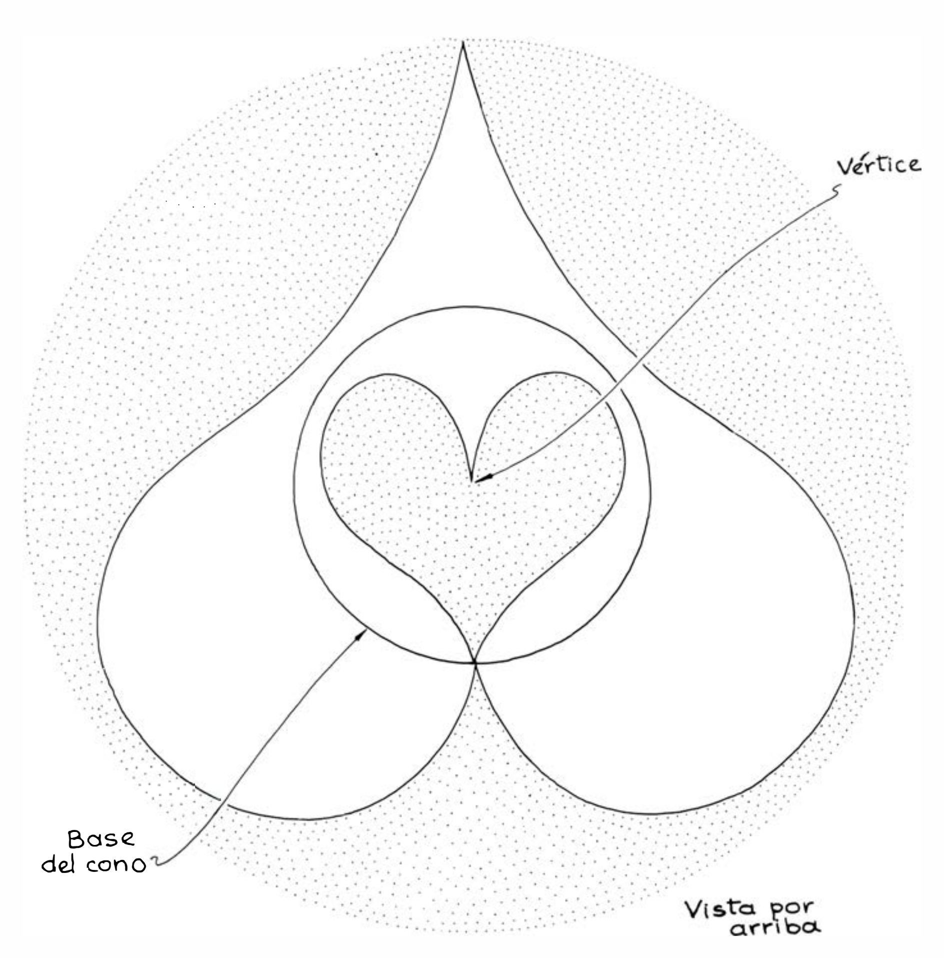
Geometría de la reflexión

El aspecto de la anamorfosis fotográfica puede adivinarse representando gráficamente las nuevas posiciones de cada porción de la escena original existente en la diapositiva. Ello se hace como sigue. Se retira el cono. Se enfoca la diapositiva sobre una hoja de papel ordinario. Se elige una pequeña superficie de la imagen y se mide su distancia al origen de coordenadas (donde estará el centro de la base del cono cuando éste se coloque sobre el papel). Se echa luego mano de la fórmula para determinar la nueva distancia r' correspondiente a esa porción de la escena. Un procedimiento sencillo para medir el semiángulo en el vértice del cono consiste en determinar el arco seno del radio de la base dividido por la generatriz del cono (que es la distancia del vértice a la base medida a lo largo de la superficie lateral).

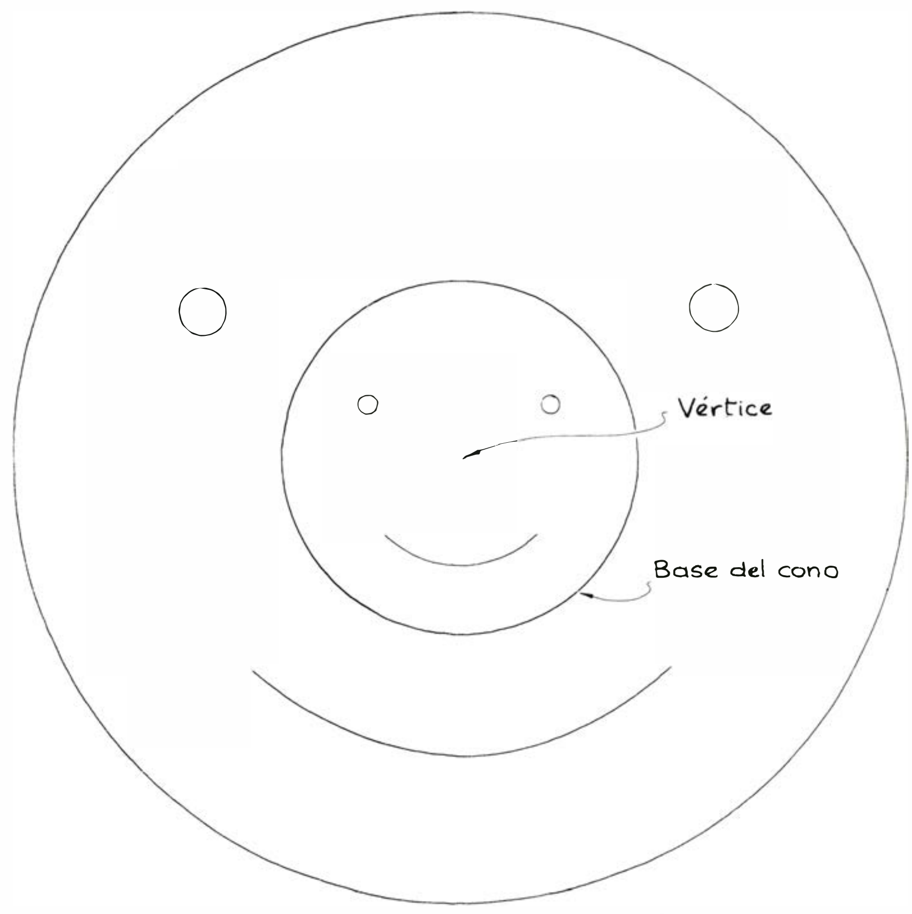
Para proyectar la escena original sobre la anamorfosis, se recubre totalmente el papel con un reticulado circular. Entonces se elige una sección de la escena original situada a una distancia r del origen y que abarque un ángulo conocido en torno al origen. Dicha superficie debe reproducirse a una nueva distancia r' del origen y con la misma extensión angular. Si la nueva posición está próxima a la base del cono, la nueva superficie se parecerá a la superficie original. Si la nueva posición está alejada de la base, la nueva superficie aparecerá como estirada, en forma de sector circular alrededor del origen.

Si preferimos un método más rápido, podemos recurrir al ordenador para que construya representaciones anamórficas. La entrada debe incluir las coordenadas de todas las secciones de la escena original: su radio inicial R y el ángulo que abarca, un grado por ejemplo. El ordenador calculará las nuevas posiciones y (si dispone de trazador) representará gráficamente los resultados para el nuevo radio y un ángulo de un grado.

Waldo Tobler, de la Universidad de California en Santa Bárbara, ha construido una anamorfosis con ordenador a partir del dibujo de una figura femeni.



Corazón con su versión anamórfica



"Cara feliz" con su versión anamórfica

na trazado por Stork sobre papel cuadriculado. Patricia S. Irle, alumna de Tobler, introdujo los datos correspondientes a 1450 puntos del dibujo en un ordenador Tektronix 4051. El ordenador imprimió el dibujo original y, luego, el programa reflejó la imagen dada por un cono, aplicando la fórmula de transformación para determinar la distancia de cada punto al centro de la imagen. Finalmente, el ordenador imprimió la imagen deformada. Cuenta Stork que si coloca el cono en el centro de la impresión y mira cuidadosamente hacia abajo la superficie reflectora del cono, contempla la imagen del dibujo original. Sin el cono, no vería sino la versión anamórfica.

Con un ordenador personal podemos acometer el mismo tipo de transformación. Si no se dispone de impresora, la transformación puede representarse directamente en la pantalla. Se empieza escribiendo un programa que "dibuje" una figura en la proximidad del centro de la pantalla. De hecho, este dibujo constará de múltiples elementos rectangulares, muy pequeños, encendidos por el ordenador. Como éste tendrá que recordar las posiciones de los elementos, habrá que guardarlas en memoria.

El programa aplica, a cada rectángulo, la fórmula de la transformación debida al cono. En puntos más alejados del centro de la pantalla, se encenderán entonces nuevos rectángulos; éstos constituyen la anamorfosis. Colocando un cono en el centro de la pantalla y observando por su superficie lateral, veremos en la reflexión una forma parecida al dibujo original.

No se consigue una reproducción completa porque el monitor ilumina rectángulos y no manchas diminutas; de ahí que se pierdan detalles de las curvaturas. Además, la rectangularidad de los elementos significa que la amplitud angular de parte de la figura no se proyectará fidedignamente sobre el nuevo radio. Con todo, la velocidad del ordenador posibilita estudiar muchas figuras. Cambiando la fórmula de transformación pueden estudiarse otras imágenes anamórficas. Ejemplos de ello pueden encontrarse en el artículo de Andy A. Zucker reseñado en la bibliografía, en la última página de la revista.

Hay deformaciones anamórficas muy interesantes. En ese sentido, Stork me ha remitido los resultados que dan tres dibujos sencillos tras sufrir una deformación anamórfica a través de un cono. Trazó, en uno de ellos, un corazón (como un encendido amante), coloreando de rojo su interior y, de blanco, la superficie que lo rodeaba. Después de la transformación, se encontró con un corazón blanco rodeado de rojo. Los colores y la orientación se habían trastrocado porque el cono intercambió el centro del dibujo con su perímetro y viceversa.

En otro caso, dibujó una "cara feliz", o sea, un círculo con dos puntos gruesos a modo de ojos y un arco de cincunferencia a modo de boca. De la transformación salió otra cara feliz con la misma orientación. He podido observar que si la boca era originalmente una línea casi recta, en su transformación a la versión anamórfica la cara aparecía aún más risueña. ¿Podríamos imaginar un diseño cualquiera para el que la transformación a través de un cono diera por resultado el mismo diseño, aunque con un significado diferente?

Les describía en enero una ilusión óptica que se presenta cuando escudriñamos horizontalmente la pantalla de un televisor. Si nos fijamos en la televisión de una manera conveniente, pueden observarse varias imágenes de su contenido como flotando en el aire a un costado del aparato. Esta ilusión depende esencialmente de dos cosas: la persistencia de la visión y la aparición y desaparición rápidas de la imagen que hay en pantalla.

Brian Glassner, alumno de la Universidad estatal de Cleveland, ha señalado que la misma ilusión puede percibirse en las pantallas electrónicas de algunas calculadoras y en las de muchas máquinas de billar más recientes y otros juegos electrónicos. Si la representación en pantalla se hace a base de diodos emisores de luz, lo más probable es que sea pulsante. Esta pulsación es demasiado rápida para que la detecte nuestra vista, pero significa que la imagen representada aparece y desaparece sin solución de continuidad.

Si barremos rápidamente con la vista nuestro campo visual de un lado a otro, la luz destellante excitará ciertas zonas de nuestra retina. Tras el barrido, cada una de dichas zonas producirá una imagen independiente del objeto. Y, en consecuencia, las imágenes se percibiran mal si estuvieran flotando a un costado de la figura verdadera.

Me ocupé en mayo de 1978 de otra ilusión óptica. Se trataba de lo siguiente. Si se hacía oscilar un péndulo y se observaba con un ojo cubierto por un filtro obscuro, pero no opaco, el péndulo parecía describir una elipse. Esta ilusión, conocida como ilusión de Pulfrich, la han atribuido algunos investigadores al retraso en la percepción que

sufre el ojo entorpecido. Evidentemente, la reducción en la intensidad de la luz que llega a ese ojo hace que la señal transmitida al cerebro se retrase. Entonces, la discrepancia entre las informaciones facilitadas por ambos ojos obliga al observador a interpretar que el péndulo está más cerca o más lejos de lo que se halla en realidad. La diferencia entre la distancia aparente y la real varía con la velocidad del péndulo, siendo menor cuando el péndulo va más despacio al alcanzar el extremo de una oscilación.

Jerry Harris, de Worthington, Ohio, acaba de informar sobre una ilusión, relacionada con la anterior. Puede crearse con una figura de curvas de Lissajous reproducida en un osciloscopio. Para ello, conectó un generador de señales a la entrada vertical del osciloscopio y otro generador de señales a la entrada horizontal. Así, las señales senoidales de los generadores arrastraban la traza del osciloscopio vertical y horizontalmente a la vez.

Ajustando convenientemente las frecuencias de las señales, la traza describía una curva de Lissajous en la pantalla. Si las frecuencias se separaban levemente de sus valores óptimos, seguía apareciendo la figura, pero variaba paulatinamente. Muchas veces, un observador podría interpretar esta figura cambiante como si fuera un objeto tridimensional que diese vueltas lentamente en torno a un eje fijo. Se diría que la perspectiva del objeto aparentemente tridimensional varía.

Cuando las frecuencias se igualan, la figura podría ser un círculo. Con una ligera desigualdad, el círculo aparenta girar en torno a un eje contenido en la pantalla. A veces, se ve el plano del círculo completo; otras, se ve de canto. El sentido de rotación es arbitrario.

Harris ha modificado este experimento clásico sosteniendo un filtro opaco (un par de filtros polarizadores parcialmente cruzados) sobre un ojo, al objeto de retrasar la percepción de la figura de la pantalla por parte de dicho ojo. Este retraso introdujo la sensación de profundidad en su interpretación del objeto, cabe suponer que al igual que en la ilusión de Pulfrich. La apariencia de profundidad eliminaba la ambigüedad de la rotación del objeto aparentemente tridimensional, al que se veía girar en torno a un eje vertical contenido en el plano de la pantalla. Cuando Harris inclinaba la cabeza de modo que sus ojos quedasen en un eje vertical, el eje de rotación del objeto aparentaba estar horizontalmente. Cuando cerraba uno cualquiera de los ojos, desaparecía el efecto de tridimensionalidad.

Libros

Paleoantropología, historia de la matemática y un manual universitario de termodinámica

Arturo Valls, Javier de Lorenzo y Luis Condal

La Formación de la Humanidad, por Richard E. Leakey. Ediciones del Serbal, Barcelona, 1981. 256 págs. En el intervalo de unos cuantos meses se han sucedido las ediciones de libros que versan sobre la evolución humana. En lengua inglesa han sido los más destacados, a nuestro entender, el de J. Reader *(Missing links: The hunt for earliest Man)*, el de D.C. Johanson y M.A. Edey *(Lucy: The beginnings of humankind)* y *The making of Mankind*, cuya traducción al castellano acaba de aparecer y —anticipémoslo— juzgamos como un claro beneficio para los interesados en este tema que, directa o tangencialmente, a todos nos atañe. Es, en realidad, el texto ampliado de los episodios de una serie televisiva de la BBC, que no perdió, empero, el rigor científico al dirigirse al público en general. Doce temas, y otros tantos capítulos, ha escogido R.E. Leakey (de cuya obra precedente *Los orígenes del hombre* ya dimos cuenta en esta revista) para recorrer el camino que emprendió el hombre hace unos quince millones de años y resumir, en unas 250 páginas, lo que sabemos de él. El registro fósil de nuestra especie confirma que en la antropología lo que se encuentra suele ser más importante que lo que se busca, y prueba reciente de ello son las huellas de Laetoli, demostrativas de que nuestros antepasados de hace más de tres millones y medio de años andaban erguidos y avanzaban por zancadas.

Los dos primeros capítulos de la obra ("Comprender nuestros orígenes" y "Tiempo y cambio") constituyen una aprovechable introducción a los principios más básicos del hecho evolutivo y de su demostración paleontológica, pero llevándonos de la mano a través de la experiencia personal del autor y no con el frío rigor de un texto científico.

Pasamos luego a nuestros "Antepasados antropoides", el heterogéneo grupo de los Driopitecinos, donde se inició el bipedismo, aunque su origen en *Ramapithecus* por la hipótesis de Jolly sea informativa pero debatible. Se hace alusión al calendario de la evolución de los Hominoideos según Pilbeam, que está en contradicción con las pruebas de la evolución molecular. Es notable observar cómo la evolución de nuestra especie ha quedado impregnada, a través de las distintas épocas, en su interpretación, por el predominio de un factor casi exclusivo: durante unos años se admitió que era el cerebro lo que nos hacía humanos (¿quién no recuerda los distintos rubicones propuestos por los paleoantropólogos de los años treinta y cuarenta?); luego fue el desarrollo técnico lo que nos diferenciaba de los otros Primates (polémicas sobre *prometheus*, por ejemplo); más tarde el comportamiento, cuando la etología se puso de moda durante una temporada para separarnos "dignamente" de nuestros parientes no humanos; posteriormente fue el lenguaje, hasta que experiencias de todos conocidas derrumbaron también este supuesto "muro de la verguenza"; y, finalmente, hoy se esgrimen argumentos —cómo no— de tipo económico-social que aducen que es nuestro género de vida cooperativo y no individualista lo que nos distingue como hombres. Los antropólogos nos preguntamos ya con impaciencia qué varita mágica nos permitirá en los años ochenta distinguirnos definitivamente de tan molestos parientes, cuyo parecido atenta a nuestro orgullo de productos de un acto especial de "creación".

En el capítulo 4, "Los Homínidos primitivos", asistimos a la historia de los descubrimientos de *Australopithecus* y de *Homo* en Africa meridional u oriental, con una bien discutida interpretación del significado paleoantropológico de la formación de las cuevas fosilíferas sudafricanas. ¿Constituye *A. afarensis* una sola especie con un dimorfismo sexual bien marcado o dos especies, aunque sutil, claramente distintas? Leakey apoya, convincentemente al parecer, esta segunda hipótesis. A nuestro juicio, lo mejor del capítulo es la discusión final sobre la coexistencia de los homínidos primitivos africanos en los econichos pliopleistocénicos. Aquí Leakey apoya las ideas de Robinson, completadas por los recientes hallazgos de Walter en el esmalte y la dentina fósiles, sobre el papel crucial de la alimentación y del cambio dietario.

"La basura del pasado" (cap. 5) es una parte de nuestro comportamiento fosilizado. Los instrumentos de factura homínida de Omo y de Hadar tienen, como máximo, unos dos millones de años, o sea, un retraso de un millón y medio de años —por lo menos— respecto a nuestra adquisición del bipedismo, como antes señalé. La principal lección que nos muestra este capítulo es que, en nuestros días, se ha transcendido en la paleoantropología el mero estadio tipológico y se interroga a los instrumentos de piedra de nuestros antecesores de una forma mucho más perspicaz de lo que deja presumir su seca y amortajada presencia en las vitrinas de algunos museos. Desde luego, gracias a las técnicas precisas (algunas de ellas nos las describe someramente Leakey) que ayudan a reconstruir el pasado social (empleemos este término como concesión a una escuela interpretativa de nuestra conducta pliopleistocénica) de los antepasados del hombre. ¿Qué compartieron primero estos antepasados: la caza o los productos vegetales? ¿El alimento aportado cooperativamente por los varones del grupo o los vegetales recogidos por las mujeres? ¿Sirvieron los instrumentos líticos preferentemente para descuartizar o para pelar cáscaras? ¿Quién tiene razón, Washburn y su escuela con la hipótesis cazadora o Slocum y sus seguidores con la hipótesis recolectora? Personalmente, muchos no-especialistas en tales cuestiones opinamos que la postura ecléctica, como tantas veces en los problemas antropológicos, puede ser la más aceptable (lo que no quiere decir, en absoluto, la "centrista"). Y encontramos razonables los estudios de Isaac, por ejemplo, demostrativos de que un grupo omnívoro no sólo dispondría de más recursos, sino que, además, estaría favorecido selectivamente respecto a otros grupos con dieta más limitada y, por tanto, exclusiva. Quizá los instrumentos líticos encierren las respuestas a todos estos interrogantes.

En los capítulos 6 y 7 ("La vida del cazador-recolector" y "Nuevos horizontes") se hace una síntesis de los trabajos de Lee como paradigma del

género de vida cazador-recolector, y se evocan los yacimientos de Trinil, Olorgesailie, Chu-Ku-Tien, Terra Amata, etc. del *Homo erectus,* respectivamente. No son capítulos muy "académicos", pero sí de los más atractivos del libro y se leen con gran avidez. El octavo, que trata del "Nacimiento del lenguaje", no enseñará nada original al antropólogo; constituye, no obstante, una buena revisión de los experimentos con chimpancés y de las especulaciones sobre la reconstrucción de la corteza encefálica a base de moldes endocraneales.

"El hombre de Neanderthal" se estudia en el capítulo 9. Tras pasar una rápida, pero no superficial, revista a los cráneos-mosaico europeos de Petralona, Arago, Swanscombe, etc., se plantea la disyuntiva del origen del *Homo sapiens sapiens*. ¿Procede del *H.s. neanderthalensis* y éste, a su vez, del *H. erectus,* o son ambos productos evolutivos de esta última especie? A lo largo de todo el libro, Leakey se sirve del método histórico para introducirnos en el tema de cada capítulo. Este se continúa con la biografía biológica del hombre de Neanderthal y su aporte cultural (de tipo material: una tipología de más de 60 tipos de objetos identificables; de tipo no material: enterramientos rituales). El triple problema de cómo-cuándo-por qué desaparecen los Neanderthales ha de resolverse con la única respuesta real de que disponemos hoy los antropólogos, es decir, la sinceridad de nuestra ignorancia. El cuándo es posible precisarlo aproximadamente, pero del cómo y de las causas sólo disponemos de atisbos. No sería riguroso caer en especulaciones (Leakey las evita) ni en fantasías (a propósito: nos amenaza para la próxima "rentrée" cinematográfica un horroroso film franco-canadiense titulado algo así como "La guerra del fuego" que *resuelve* todos estos problemas y que se podría calificar de "S" para los científicamente sensibles).

El citar la estética nos lleva a comentar el capítulo décimo: "El arte de la glaciación". Tras la obligada visita a Lascaux y Altamira, magistralmente guiados por Leakey, se analizan los problemas interpretativos planteados por los artistas paleolíticos euroafricanos: hipótesis propiciatoria de Breuil, modelo-simbólica de Leroi-Gourhan y Laming-Emperaire, sociológica (¡como no!) de Conkey, etc. ¿Por qué no aceptar nuestras dudas en lugar de ver con ojos de hombre del siglo XX algo que miraron ojos distintos y hacer malabarismos de interpretación que no satisfacen a nadie y comprometen el rigor de una ciencia como es la paleoantropología? Quizás el arte de nuestros antepasados lo interpretara mejor y con más acierto un cazador-recolector actual que un erudito deformado. En este capítulo quizás el lector metódico se sienta un poco decepcionado ante la intromisión de la fantasía contrastando fuertemente con el hermoso rigor de las interpretaciones puramente biológicas.

Los dos capítulos siguientes, "La caza durante la transición" y "Una nueva forma de vida", relatan las últimas fases de nuestra evolución. Los primeros avances técnicos, los comienzos de la domesticación y del pastoralismo, los tanteos entre la auténtica domesticación y la pura caza realizados por algún tipo de control de las bandas animales, el paso a la agricultura (último acto que todavía están interpretando algunos de nuestros contemporáneos) y la auténtica revolución agrícola (¿causa o efecto de la complejidad de la estructura socio-económica del hombre?), el paralelismo entre evolución biológica y cultural, los primeros cultivos del trigo en el Creciente fértil y del maíz en el Nuevo Mundo, etc. La biología no está ausente en estos problemas. No se puede ignorar, por ejemplo, el estudio de Cavalli-Sforza y sus colaboradores demostrando que se puede analizar, hasta cierto punto, la transmisión de la cultura y su velocidad de difusión gracias a la distribución de determinados caracteres hereditarios en grupos actuales.

Los hombres no somos "monos asesinos", congénitamente agresivos. Esta es la tesis del capítulo 13, "La génesis de la agresividad en el hombre". El concepto freudiano del "instinto fundamental de agresión" y las ideas sobre un "primitivo canibalismo universal" (basadas en una interpretación equivocada del yacimiento australopitecino de Makapansgat) han causado mucho daño y han servido de excusa a muchos horrores por su difusión deliberada por parte de algunos pseudocientíficos (Ardrey y su *Génesis africana* es un botón de muestra) y de numerosos escritores, sin excluir al Nobel Lorenz. Brain ha reanalizado recientemente Makapansgat y la industria osteodontoquerática y no ha encontrado pruebas apodícticas de nuestra agresividad congénita, colectiva y original. Leakey nos lo explica con bastante detalle. La expresión moderna de esa agresividad, la guerra, es una respuesta condicionada a los cambios de circunstancias y se debe a la naturaleza de la sociedad y no a la naturaleza biológica del hombre.

Pero hay un riesgo. Que no sepamos evitar, culturalmente, la respuesta violenta a tales cambios, y de ahí nuestro temor al futuro, el tema del capítulo final. La agresión en el mundo animal y la guerra de los humanos son algo muy distinto. No hay genes de agresividad. Nacemos con muy pocas respuestas instintivas y nuestras respuestas son función, en grandísima parte, de la cultura en que nos encontramos. Que uno a uno o colectivamente seamos agresivos o pacíficos depende de nuestra flexibilidad de comportamiento, a diferencia de los otros animales. Instintivamente no somos nada en cuanto a nuestro comportamiento, somos simplemente pacíficos o agresivos como resultado de nuestro contexto cultural. Si una cultura predica la idea de que fatalmente estamos destinados a enfrentarnos periódicamente, con armas cada vez más terribles, esa idea puede arrastrarnos al conflicto porque el hombre tiende a materializar sus creencias. Si eliminamos la idea (con demostraciones, no con retórica, y aquí está un corolario de la utilidad de conocer nuestra evolución y las creencias de nuestros semejantes), no tendremos base para materializarla. El futuro es de nuestra propia responsabilidad. Hay creencias que más vale no materializarlas; esa es la poesía de nuestra evolución biológica.

El libro está impecablemente presentado y la traducción apenas presenta errores. Tipográficamente la edición está cuidada. A pesar de ello, encontramos 'agta" en vez de "aeta" (pág. 105), "Islanders", sin traducir (pág. 203, mapa; se refiere a los Andamaneses), y otras minucias que el lector puede corregir con facilidad. Sin embargo, en la página 150 se dice que Marcellin Boule era del Museo Nacional de Historia de Francia (sic) y en las páginas 115 y 125 (aquí por dos veces) se escribe "cervical" en lugar de "craneal", que puede ser más confuso. La iconografía, tan excelente como la del original. Personalmente, por ser poco amigo de las "reconstrucciones", he apreciado menos los técnicamente excelentes dibujos y "escenas" de la vida del hombre primitivo realizados por Ron Bowen, que más bien substraen rigor al texto aunque agradan al público culto al que se destina esta magnífica síntesis de nuestra evolución. Quizás alguien entre ese público eche de menos algún tipo de referencia bibliográfica donde ampliar este problema biológico que, sin duda, este libro contribuirá a hacer admirar y reflexionar. (A.V.)

HISTOIRE DES MATHEMATIQUES, 2, por Jean-Paul Collette. Editions du Renouveau Pédagogique Inc. Ottawa, Canadá, 1979. Distribuido en Francia por Librairie Vuibert, París. pp. VIII + 359. Constituye el segundo volumen que complementa y finaliza el publica-

do, por la misma editorial, en 1973. Comprende, temporalmente, desde los comienzos del siglo XVII hasta las grandes escuelas de pensamiento matemático del siglo XX; en el fondo, el mayor aporte en cuanto al contenido del hacer matemático iniciado en el s. XVII con el desarrollo de la geometría analítica, el origen del cálculo de probabilidades y la geometría proyectiva, los inicios del cálculo diferencial e integral, teoría de números, intentos de mecanización del cálculo aritmético, rectificación y gráficas de curvas...

La obra se estructura en tres partes —s. XVII, s. XVIII y siglos XIX-XX— y 11 capítulos. Cada capítulo finaliza con una bibliografía y una serie de ejercicios que hacen referencia tanto a cuestiones generales acerca de los autores tratados como a verdaderos ejercicios de resolución matemática, siempre a nivel elemental. En este punto cabría señalar que los ejercicios no se han enunciado conforme a los textos originales, sino 'con motivo de' los mismos. Numerosas fotografías de matemáticos, reproducción de textos y gráficas logran una presentación realmente atractiva para este volumen, algo empañada por algunos errores de imprenta o repetición de líneas. Finaliza con índices de ilustraciones, de nombre de autores y de materias.

El objetivo que el autor, de modo explícito, señala para esta obra es iniciar al lector en la historia de la matemática. Y, para ello, intenta, por un lado, informar del trabajo de cada matemático tras una breve biografía del mismo. Por otro lado, exponer "las nociones históricas comúnmente aceptadas por los historiadores". Se enfoca la historia de la matemática, de esta manera, como fuente inagotable para que el profesor de matemática asegure mejor su enseñanza, a la vez que se pretende que todo matemático conozca las fuerzas evolutivas que han formado su pensamiento. Para J.P. Collette, si el matemático no conoce la historia de su disciplina, pierde una perspectiva preciosa. A pesar de estos objetivos, el autor reconoce que no se trata de un tratado sino de un manual, que ha surgido y se ha desarrollado de las explicaciones en clase. El autor no discute ni da más planteamientos metodológicos o conceptuales. Y creo que es, en este punto de partida, realmente acrítico, en el que se encuentra la mayor debilidad de un manual que, sin embargo, y al nivel en que voluntariamente se sitúa, constituye uno de los mejores que pueden encontarse actualmente.

Desde un aspecto de crítica conceptual cabe una serie de reparos. Así, cuestiones, viejas cuestiones respecto a la atribución de teoremas, proposiciones, teorías a unos u otros autores; atribución de 'errores'... Por un ejemplo: J.P. Collette, al mencionar a Descartes, y tras un breve esquema biográfico, pasa a describir las contribuciones científicas cartesianas. Y "La primera contribución matemática de Descartes... concierne al descubrimiento de la fórmula generalmente atribuida a Euler

$$s+f=a+2$$

donde s, f y a representan respectivamente el número de vértices, caras y aristas en un poliedro simple" (p. 6). Afirmación gratuita, porque mantiene la leyenda, iniciada en 1860 tras la traducción y publicación de la copia de Leibniz del tratado cartesiano *De solidorum elementis* y sostenida especialmente por Jonquières, de atribuir dicha fórmula a Descartes, aunque la misma no se encuentra explícitamente formulada en el tratado traducido, ni en ningún otro, escrito por Descartes. Algo se ha publicado sobre el tema, y el propio autor cita un libro, tesis doctoral de J.P. Pont, en la bibliografía de otro capítulo, tesis doctoral que comienza discutiendo y negando la atribución de la fórmula de Euler a Descartes, con todo un haz de argumentos, tanto propios como de Hadamard y Lebesgue, de carácter en algún caso psicológico, a los que habría que agregar alguno estrictamente conceptual, como la imposibilidad de pensar en 'poliedro' por parte de Descartes que sigue razonando con líneas poligonales y es Euler quien pasa al término *acies* frente al viejo *latus* (lado poligonal).

Problema de atribuciones condicionado, desde mi punto de vista, por la idea admitida acríticamente del 'progreso' de la matemática. Idea que conlleva la admisión de que lo que se formula en un texto, en el lenguaje propio de una cierta matemática, se mantiene para siempre, con validez atemporal, si se lo separa de la 'escoria'. Escoria que no es otra cosa que la metafísica —en sentido despectivo— que rodea a la matemática y que se centra tanto en las especulaciones de los matemáticos, como en las ideas y en el lenguaje en que los mismos se expresan. Al no plantearse este problema, el autor ha de atribuir, por más ejemplos, ideas 'elementales' a Euler en cuanto a las bases lógicas del cálculo, o ambigüedad de algunas expresiones como "suficientemente pequeños", "deviene y permanece" a Cauchy, indicando que tales expresiones y ambigüedades tendrán que ser suprimidas, y gracias a expresiones numéricas, en beneficio del rigor que se producirá en el s. XIX en torno al análisis. No ve el autor que tales expresiones son algo inherente a la obra y pensamiento de Cauchy, porque éste sigue pensando y hablando en el lenguaje de indivisibles y que, por ello, su continuo no puede ser aritmetizado al modo clásico, porque es un continuo especial, no arquimediano, aunque tampoco con transfinito actual, por lo que ha de manejar una variable 'dinámica'. Variable que, por ello, y por haber acotado el manejo de las series a las potenciales, impide diferenciar la convergencia de la convergencia uniforme. Diferencia sólo explicable desde un enfoque de aritmetización posterior. Atribuir, así, un error o una debilidad lingüística a Cauchy es seguir una vieja tradición histórica —en la que también cae Bourbaki—, pero es olvidar la auténtica situación histórica en la que se mueve cada matemático. En este caso, es atribuir a Cauchy un 'error' sólo cometido por quien se lo atribuye, porque Cauchy no piensa en términos aritméticos sino de indivisibles.

Idea de progreso, de 'verdaderas matemáticas' separadas de lo que no es sino pura especulación, que el autor irá señalando permanentemente. Aceptación de una posición que, por otro lado, y salvo respecto al origen de la matemática —discutido en el volumen anterior—, conduce a que la historia no se muestre más que como un autodesarrollo conceptual interno a la matemática, a saltos de genio, pero sin interrelación alguna con otros haceres también conceptuales. Desarrollo interno en un sentir cuasi hegeliano, con un progreso en el rigor, en la extensión de los contenidos. Y, sin embargo, el autor no puede menos de reconocer, en la introducción a la tercera parte —que comprende seis de los once capítulos—, que la matemática del s. XIX presenta otro aspecto totalmente diferente de la de siglos anteriores. Y no sólo en cuanto al contenido, sino en cuanto a los métodos. No sólo de mero aspecto, tendría que agregar aquí, sino que es otro tipo de hacer conceptual, que pretende autoalimentarse, separado de otros haceres como el astronómico o el físico, y que se va a centrar en la teoría de números, en la problemática del infinito actual y en la formalización operacional, tres de los más poderosos instrumentos al servicio del 'honor del espíritu humano'. Creencias en una pureza que condicionan de modo decisivo la marcha del matemático, sus trabajos, el enfoque de los mismos, incluso las polémicas como las que se entablarán entre Cantor y Kronecker —y no sólo por ser judíos de tendencias distintas—, sino por la idea

básica de qué entender por matemática. Y es el no entrar en discusiones metodológicas ni en matizaciones lo que conduce a dar las formulaciones, no en la versión original, sino en lectura actual. Traducción de un texto de un estilo matemático a otro que lleva a tergiversar lo que de más puro presentaba el texto a traducir. Y he hecho referencia a Euler o Cauchy.

A pesar de estos reparos —que cabe generalizar a casi todas las historias de la matemática que, en lugar de historia, no constituyen otra cosa que reconstrucciones racionales de la misma— debo señalar que J.P. Collette presta una atención grande a cuestiones como la de fundamentos, orilladas en general en otro tipo de historias. Aunque ello le lleve, como en el caso de Dedekind, a prestar una atención única a su construcción de los números reales dejando sin mención sus restantes contribuciones, de especial importancia en campos como los de teoría de números y álgebra. En cambio, Frege se beneficia de este tipo de atención y aparece con una extensión merecida, aunque sorprendente en lo que se quiere un mero manual.

Y, como manual, insisto en su valor de instrumento, inscrito en la renovación pedagógica mundial de una 'vuelta a lo básico'. Valor de instrumento de renovación pedagógica especialmente, aunque, por los reparos críticos señalados —que también se dirigen a la primera parte—, ha de manejarse con las debidas precauciones. (J.L.)

TERMODINAMICA. Introducción a las teorías físicas de la termostática del equilibrio y de la termodinámica irreversible, por Herbert B. Callen. Editorial AC, Madrid, 1981. Se trata de la traducción de un libro aparecido en Estados Unidos hace ventiún años, cuya valoración resulta difícil a menos que hablemos antes de una tendencia editorial norteamericana en la década de los sesenta que incidió poderosamente en los textos introductorios a la química física (incluida la química general). El fenómeno vino motivado por un enorme y laudable esfuerzo por mejorar la pedagogía, aunque los elementos negativos que arrastraba resultaron ser muy nocivos. Visto desde el exterior, parecía una receta para el éxito editorial, con los siguientes ingredientes: mucho enfoque microscópico, arrinconar lo macroscópico y decir con frecuencia que el material es tan sencillo que el propio lector podía haberlo desarrollado por sí mismo.

Esta peligrosa tendencia se trasvasó, vía traducciones, al castellano con una demora, en promedio, de cinco años. Obviamente, la disciplina más afectada fue la termodinámica clásica, que en no pocos textos pasó a ser un triste apéndice de una mecánica estadística ultrasimplificada. Convendría recordar, a este propósito, lo que escribió Einstein sobre la termodinámica en sus notas autobiográficas: Una teoría es tanto más impresionante cuanto mayor es la sencillez de sus premisas, más distintas las cosas que relaciona y más extenso el ámbito de su aplicación. Y si ese juicio vale en algún momento, nunca mejor que en el ámbito de la termodinámica. Afortunadamente para la ciencia, la década siguiente (años setenta) trajo una reacción de las mismas editoriales con textos de química física y química general que son un modelo de equilibrio entre lo macroscópico y lo microscópico, aparte de una pedagogía de conjunto mucho más correcta.

Volviendo al libro que nos ocupa, diremos que se trata de una decisión valiente (en los años en que se publicó): el libro es esencialmente macroscópico, cual corresponde a la termodinámica clásica como capítulo de la física (y de la química). Lo que no significa que el autor evite toda consideración microscópica, sino que busca un camino más elegante y útil: incorporar lo microscópico a nivel de conceptos básicos, para facilitar así el posterior estudio de la mecánica estadística.

El lector avisado en esta materia se encontrará sorprendido en las primeras páginas con una inesperada definición: "La termodinámica es el estudio de las consecuencias macroscópicas de las innumerables coordenadas atómicas que, en virtud del promedio estadístico, no aparecen explícitamente en la descripción macroscópica de un sistema dado". Y sigue: "el calor es la transferencia de energía a los modos atómicos de movimiento ocultos".

Una importante característica de este libro, que ya se anuncia en la primera línea del prólogo, consiste en substituir el desarrollo inductivo tradicional por el planteamiento de unos postulados intuitivos o razonables (hay una justificicación estadística en un apéndice), siguiendo el método de L. Tisza. Así, los cuatro principios de la termodinámica (incluido el principio cero sobre el equilibrio térmico) se convierten en cuatro postulados fundamentales: el primero, sobre la existencia de estados particularmente sencillos, llamados de equilibrio; el segundo, sobre la función entropía como criterio de equilibrio; el tercero, sobre la aditividad y otras propiedades de la entropía; y el cuarto es la anulación de la entropía en el cero absoluto. A partir de estos cuatro principios se estructura toda la primera parte del libro: "Principios generales de la termodinámica clásica". Aunque la claridad y concisión están presentes a lo largo de todo el libro, quisiéramos resaltar los dos capítulos sobre las transformaciones de Legendre, por la especial dificultad que entraña este asunto.

En la segunda parte, titulada "Aplicaciones representativas", se aborda la termodinámica química, la elasticidad y el magnetismo y electricidad. Esta parte no es una colección de aplicaciones prácticas concretas, sino más bien el material necesario para conectar parte general y aplicaciones. La tercera parte ("Fluctuaciones y termodinámica irreversible") no sólo sirve para complementar el libro con un cuerpo de doctrina importante, sino que lo aprovecha el autor para completar la conexión con el mundo microscópico.

Cierran el texto siete apéndices que no podían intercalarse en la estructuración lógica del libro: algunas relaciones en que intervienen derivadas parciales, significado estadístico de la entropía, equilibrio con ligaduras adiabáticas internas, propiedades de los gases, propiedades de los sólidos y líquidos simples, varios procesos cíclicos comunes y matrices y forma cuadrática de la estabilidad.

Comentario aparte merecen los problemas que abundan al final de cada sección, cuyo primer rasgo a resaltar es su diversidad en objetivos, nivel y longitud. A modo de ejemplo, en el primer capítulo se aporta una lista de diez presuntas ecuaciones fundamentales, invitando al lector a que encuentre cinco que son incompatibles con algún principio fundamental.

En conjunto resulta un texto extraordinariamente apropiado para estudiantes de matemáticas, de física y de química en su vertiente más científica. Quizá rebase el nivel buscado por los estudiantes de ingeniería (tanto en sus especialidades físicas como químicas), que suelen ver la termodinámica como una herramienta que puedan asimilar fácilmente. Lo que no empece que un ingeniero que quiera profundizar la estructura básica de la termodinámica pueda sacarle partido.

En lo referente a la traducción, el éxito acompaña al esfuerzo invertido, no menor si atendemos a la complejidad de este tipo de obras. He cotejado la edición original y la versión en varios trozos difíciles, descubriendo una rara habilidad del traductor para mantener el equilibrio entre una traducción literal y una versión libre. (L.C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

VALORES Y ACTITUDES DEL PUEBLO POLACO

ROLE AND LIMITS OF THE FUNCTIONAL APPROACH IN FORMULATION OF THEORY OF ATTITUDES. Stefan Nowak en *Understanding and Prediction: Essays in the Methodology of Social and Behavioral Theories.* D. Reidel Publishing Co., 1976.

LIKE FATHER, LIKE SON? Stefan Nowak en *Polish Perspectives*, vol. 19, n.º 7-8, págs. 10-20; julio-agosto, 1976.

LA SALINIDAD DE LOS RIOS

REPORT ON WATERLOGGING IN RELATION TO IRRIGATION AND SALINITY PROBLEMS, LAHORE, PAKISTAN, 16-28 NOVEMBER, 1964: REPORT No. 1932. Dirigido por Gasp van't Leven. Expanded Program of Technical Assistance. FAO, 1965.

SALINITY PROBLEMS AND MANAGEMENT IN RIVER SYSTEMS. Arthur F. Pillsbury y Harry F. Blaney en *Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers*, n.º IR 1, Proceedings Paper 4733, 1966.

WATER QUALITY CRITERIA: REPORT OF THE NATIONAL TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE TO THE SECRETARY OF THE INTERIOR. Federal Water Pollution Control Administration, 1968.

LA ATMOSFERA DE VENUS

SCIENCE, vol. 205, n.º 4401; 6 de julio de 1979. (Número monográfico dedicado al Pioneer Venus.)

STRUCTURE AND CIRCULATION OF THE VENUS ATMOSPHERE. G. Schubert, C. Covey, A. D. Del Genio, L. S. Elson, G. Keating, A. Seiff, R. E. Young, J. Apt, C. C. Counselman III, A. J. Kliore, S. S. Limaye, H. E. Revercomb, L. A. Sromovsky, V. E. Suomi, F. Taylor, R. Woo y U. von Zahn en *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, págs. 8007-8025; diciembre, 1980.

THE THERMAL BALANCE OF VENUS IN LIGHT OF THE PIONEER VENUS MISSION. M. G. Tomasko, P. H. Smith, V. E. Suomi, L. A. Sromovsky, H. E. Revercomb, F. W. Taylor, D. J. Martonchik, A. Seiff, R. Boese, J. B. Pollack, A. P. Ingersoll, G. Schubert y C. C. Covey en *Journal of Geophysical Research*, vol. 85, págs. 8187-8199; diciembre, 1980.

INGENIERIA GENETICA EN CELULAS DE MAMIFERO

ALTERING GENOTYPE AND PHENOTYPE BY DNA-MEDIATED GENE TRANSFER. Angel Pellicer, Diane Robins, Barbara Wold, Ray Sweet, James Jackson, Israel Lowy, James Michael Roberts, Gek Kee Sim, Saul Silverstein y Richard Axel en *Science*, vol. 209, n.º 4463, págs. 1414-1422; 19 de septiembre de 1980.

GENE THERAPY IN HUMAN BEINGS: WHEN IS IT ETHICAL TO BEGIN? W. French Anderson y John C. Fletcher en *New England Journal of Medicine*, vol. 303, n.º 22, págs. 1293-1297; 27 de noviembre de 1980.

MIMETISMO EN LAS SEÑALES SEXUALES DE LAS LUCIERNAGAS

INSECT BIOLUMINESCENCE. James E. Lloyd en *Bioluminescence in Action*, dirigido por Peter J. Herring. Academic Press, 1978.

SSEXUAL SELECTION IN LUMINESCENT BEETLES. James E. Lloyd en *Sexual Selection and Reproductive Competition in Insects*, dirigido por Murray S. Blum y Nancy A. Blum. Academic Press, 1979.

EL POTASIO Y EL SODIO EN LAS CELULAS VIVAS

CATION TRANSPORT IN BACTERIA: K^+, NA^+ AND H^+. F. M. Harold y K. Altendorf en *Current Topics in Membranes and Transport*, vol. 5, págs. 2-45, 1974.

ION TRANSPORT IN PLANT CELLS. E. A. C. MacRobbie en *Current Topics in Membranes and Transport*, vol. 7, págs. 1-40, 1975.

SOME COMMON ASPECTS OF ACTIVE SOLUTE TRANSPORT IN YEAST AND MOUSE ASCITES TUMOUR CELLS. A. A. Eddy, R. Philo, P. Earnshaw y R. Brocklehurst en *Biochemistry of Membrane Transport*, FEBS-Symposium n.º 42, dirigido por G. Semenza y E. Carafoli, págs. 250-260; Springer-Verlag, 1977.

ENERGETICS AND CONTROL OF TRANSPORT IN *NEUROSPORA*. C. L. Slayman en *Water Relations in Membrane Transport in Plants and Animals*, dirigido por A. M. Jungreis, T. K. Hodges, A. Kleinzeller y S. G. Schultz, págs. 69-86; Academic Press, Inc. 1977.

LA ARQUITECTURA DE CHRISTOPHER WREN

ST. PAUL'S CATHEDRAL: OBSERVATIONS ON WREN'S SYSTEM OF BUTTRESSES FOR THE DOME, PIERS, AND ON SOME OTHER THINGS. Somers Clark en *Sir Christopher Wren, A. D. 1632-1723.* Royal Institute of British Architects, 1923.

THE ARCHITECTURE OF SIR CHRISTOPHER WREN. Viktor Fürst. Lund Humphries, 1956.

THE STRUCTURAL ANALYSIS OF GOTHIC CATHEDRAL. Rober Mark en *Scientific American*, vol. 227, n.º 5, págs. 90-99; noviembre, 1972.

FIBRADOS Y TEORIA CUANTICA

MAGNETIC MONOPOLES, FIBER BUNDLES, AND GAUGE FIELDS. Chen-Ning Yang en *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 294, págs. 86-97; 8 de noviembre de 1977.

EINSTEIN'S IMPACT ON THEORETICAL PHYSICS. Chen-Ning Yang en *Physics Today*, vol. 30, n.º 6, págs. 42-49; junio, 1980.

TEMAS METAMAGICOS

THE CONCEPTUAL DEVELOPMENT OF QUANTUM MECHANICS. Max Jammer. McGraw-Hill Book Company, 1973.

THE MANY-WORLDS INTERPRETATION OF QUANTUM MECHANICS: FUNDAMENTAL INTERPRETATION. Dirigido por Bryce S. De Witt y Neill Graham. Princeton University Press, 1973.

THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton y Matthew Sands. Addison-Wesley Publishing Co., 1973-75.

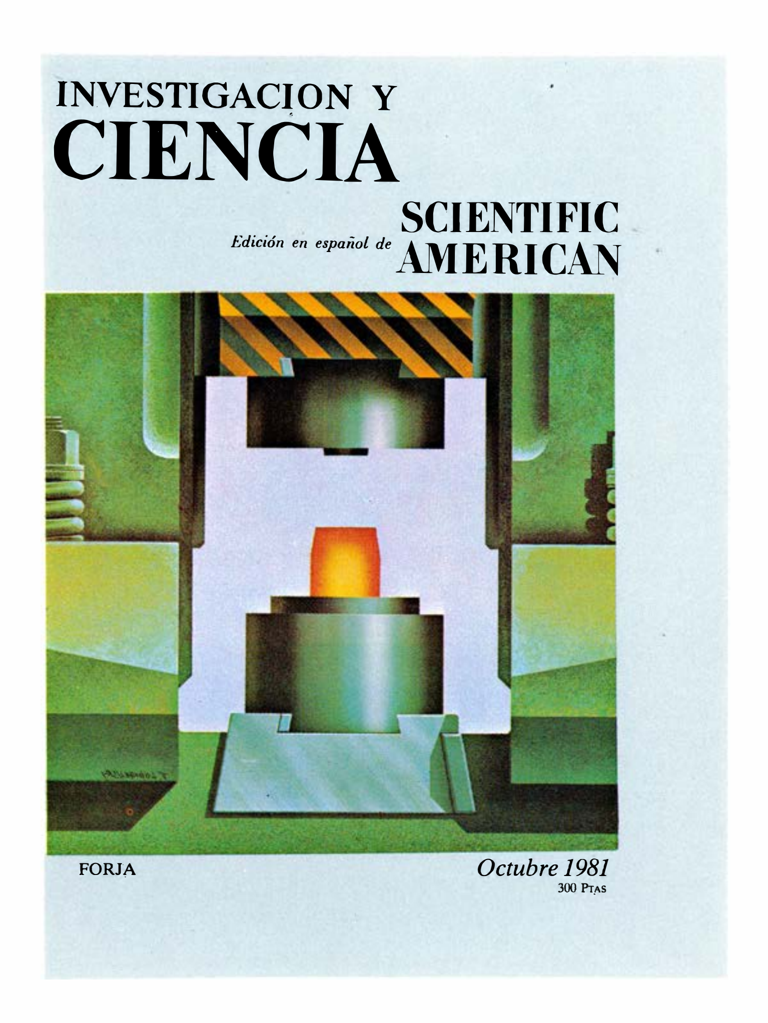
OTHER WORLDS. Paul Davies. Simon and Schuster, 1980.

TALLER Y LABORATORIO

ANAMORPHIC ART. ANDY A. ZUCKER en *Creative Computing*, vol. 3, n.º 4, págs. 137-140; julio-agosto, 1977.

ANAMORPHOSCOPES: A VISUAL AID FOR CIRCLE INVERSION. Philip W. Kuchel en *The Mathematical Gazette*, vol. 63, n.º 424, págs. 82-89; junio, 1979.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ARMAS GUIADAS CON PRECISION, por Paul F. Walker
Los misiles capaces de caer exactamente en el blanco podrían alterar el equilibrio de fuerzas sobre el campo de batalla. Especialmente vulnerables a estas armas "inteligentes" son los tanques.

ENFERMEDAD HOLANDESA DEL OLMO, por Gary A. Strobel y Gerald N. Lanier
Esta mortal infección fúngica de los olmos podrá quedar bajo control con ayuda de nuevas técnicas biológicas que atacan, a la vez, al hongo y a los insectos que lo dispersan.

EL PROGRAMA DEL ALCOHOL EN BRASIL, por José Roberto Moreira y José Goldemberg
El uso de etanol en Brasil constituye ya una realidad, tanto en mezcla de gasolina como en alcohol puro en ciertos motores.

EL RIBOSOMA, por James A. Lake
Los datos aportados por micrografías electrónicas permiten la elaboración de un modelo tridimensional del corpúsculo intracelular que sintetiza proteínas. Se comprueba, además, que el modelo satisface los distintos pasos que comprende la síntesis proteica.

MONZONES, por Peter J. Webster
Al concentrar en el continente la energía solar que alcanza el océano, estos vientos estacionales aportan agua a la mitad de la población de la tierra. Las simulaciones por medio de ordenadores permitirán pronto predecir sus fases secas y húmedas.

LA FORJA DE METALES, por S. L. Semiatin y G. D. Lahoti
Este antiguo arte de conformar los metales por golpe evoluciona merced a los avances en el terreno de la deformación de los metales y de la aplicación de ordenadores a los distintos pasos del proceso de forja.

SADI CARNOT, por S. S. Wilson
Se le conoce por su análisis de una máquina de calor ideal, pero lo que a él le preocupaba era la aplicación de la potencia mecánica del vapor. Es más, el ciclo que describió no sirve ya para la mayoría de las máquinas modernas.

LAS ESTRELLAS DE ORION MAS RECIENTES, por Gareth Wynn-Williams
Las nubes de polvo y gas de esta conocida constelación emiten radiación de longitud de onda infrarroja y de radio. Algunas de las nubes más densas parecen encubrir nuevas estrellas que proyectan rápidas corrientes de gas.

